

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS

FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRÓNICA Y ELÉCTRICA

E.A.P. INGENIERÍA ELÉCTRICA

**Cálculo, coordinación y análisis del sistema de
protección ante fallas a tierra en las subestaciones de
distribución de 10 kv en la Set Santa Marina ubicado
en la provincia constitucional del Callao**

TESIS

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Electricista

AUTOR

Oscar Antonio Díaz Sorloza

ASESOR

Victor Zenteno Clemente

Lima – Perú

2011

OSCAR ANTONIO DÍAZ SORLOZA

**CÁLCULO, COORDINACIÓN Y ANÁLISIS DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN Y
ANÁLISIS DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN ANTE FALLAS A TIERRA EN LAS
SUBESTACIONES DE DISTRIBUCIÓN DE 10 KV EN LA SET SANTA MARINA
UBICADO EN LA PROVINCIA CONSTITUCIONAL DEL CALLAO.**

Tesis presentada a la Facultad de
Ingeniería Electrónica y Eléctrica de la
Universidad Nacional de San Marcos
para obtener el título de Ingeniero
Electricista.

Área: Sistemas de Distribución

Asesor: Ing. Víctor Zenteno Clemente

Lima – Perú

2011

Dedico esta obra en memoria de mi padre José Díaz y a mi madre Guillermina Sorloza que tanto me apoya sin la que hubiera sido imposible lograr concluirla.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Empresa EDELNOR por su apoyo en la obtención de bases de datos de su registro de fallas, el apoyo y orientación del Ing. Waldo Gálvez. Así mismo agradezco a mi asesor el ingeniero Víctor Zenteno por su apoyo e invaluable aporte. A todos aquellos que participaron directa e indirectamente en la ejecución de este trabajo.

INDICE

Resumen

Abstract

I	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Objetivos	2
1.2	Justificación	3
1.3	Metodología	4
II	MARCO CONCEPTUAL	6
2.1	Sistema Neutro Puesto a Tierra	6
2.2	Sistema Neutro Aislado	8
2.3	Detección de Parámetros	10
2.3.1	Tensión Homopolar	10
2.3.2	Corriente Homopolar	10
2.4	Definición de Falla Monofásica a Tierra	12
2.5	Cálculo de cortocircuito monofásico a tierra	14
2.5.1	Calculo de corriente inicial asimétrica	15
2.5.2	Calculo de I_p	16
2.5.3	Calculo de I_B	16
2.5.4	Cálculo de I_{bASYM}	17
2.6	Rele de Protección	17
2.6.1	Rele Micom P124	17
2.7	Selección de Equipos de Protección	18
2.7.1	Transformadores de Tensión	18
2.7.2	Transformadores de Corriente	19
2.8	Aisladores	20
2.8.1	Condiciones Generales	20

2.8.2	Materiales empleados en los aisladores	20
2.8.2.1	Aisladores de porcelana	20
2.8.2.2	Aisladores de vidrio	21
2.8.2.3	Aisladores de esteatita y resina epoxi	21
2.8.3	Tipos de aisladores	21
2.8.3.1	Aisladores fijos	21
2.8.3.2	Aisladores de cadena o suspendidos	21
2.8.3.3	Aisladores especiales	23
III	MEDIO AMBIENTE DE TRABAJO	24
3.1	Definiciones	24
3.2	Topología de la Red MT	24
IV	PROBLEMÁTICA DE LAS FALLAS A TIERRA EN LAS REDES DE DISTRIBUCIÓN DE 10 KV (REDES AISLADAS A TIERRA)	26
4.1	Topología de la red MT	26
4.2	Análisis químico (Agentes contaminantes en aisladores)	27
4.3	Efectos de la contaminación en los aisladores	27
4.4	Ubicación de las zonas de corrosión severa	27
V	APORTES DEL INVESTIGADOR	28
5.1	Materiales para zona de alta contaminación	28
5.1.1	Zonas de contaminación severa	28
5.1.2	Zona de corrosión severa (desde 400 metros a 1 Km)	29
5.2	Performance de Materiales en zona de alta contaminación	29
5.2.1	Evaluación de aisladores híbridos	29
5.2.2	Evaluación de extensor de fuga	30
5.2.3	Evaluación de aislador extensor de fuga	30
5.3	Mantenimiento preventivo y correctivo	31
5.4	Interrupciones relevantes en los alimentadores críticos	32
5.5	Cálculo falla monofásica a tierra	33
5.6	Ajuste relé de protección	35
5.6.1	Angulo Característico del Rele	36

5.6.2	Función de Protección contra fallas a tierra	37
5.7	Análisis de falla monofásica y doble falla a tierra	41
5.7.1	Problemática de implementar la protección de falla a tierra.	42
5.7.2	Fallas evolutivas bajan la calidad del servicio	42
5.8	Oscilografía de una falla monofásica a tierra	43
5.9	Doble falla a tierra	43
5.10	Estadística de interrupciones imprevistas MT	46
5.11	Estadísticas de interrupciones imprevistas MT	46
5.12	Mejoramiento de indicadores de calidad FIC y TIC	48
5.13	Implementación de la protección de falla a tierra	50
VI	CONCLUSIONES	51
VII	RESULTADOS	53
VIII	RECOMENDACIONES	54
IX	BIBLIOGRAFÍA	56
X	LISTA DE TABLAS	57
XI	ANEXO	73

**CÁLCULO, COORDINACIÓN Y ANÁLISIS DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN Y
ANÁLISIS DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN ANTE FALLAS A TIERRA EN LAS
SUBESTACIONES DE DISTRIBUCIÓN DE 10 KV EN LA SET SANTA MARINA
UBICADO EN LA PROVINCIA CONSTITUCIONAL DEL CALLAO.**

Autor : Oscar Antonio Díaz Sorloza
Bachiller en Ingeniería Eléctrica.

Resumen: La detección y localización de las fallas a tierra de alta impedancia en los sistemas de distribución de Media Tensión (MT) es uno de los problemas más difíciles. En las subestaciones de distribución se contaba con Relés Primarios, los cuales solo detectan fallas por cortocircuito, por lo tanto era imposible detectar fallas a tierra de alta impedancia, las cuales tienen una corriente muy por debajo de la corriente de carga, esto como resultado de la resistencia de contacto del conductor caído con el terreno son muy altas y los problemas relacionados a selectividad y problemas relacionados a la apertura de alimentadores no involucrados en la falla.

I. INTRODUCCIÓN

Un sistema neutro aislado llamado también flotante es aquel en el que no existe conexión intencional entre los conductores y tierra. Sin embargo en todos los sistemas existe una conexión capacitiva entre los conductores del sistema y las superficies adyacentes que se encuentran a tierra.

En un sistema neutro aislado se tienen dos tipos de fallas a tierra: Falla Monofásica a Tierra y la Doble Falla a Tierra.

La filosofía de la protección para la detección de fallas a tierra en las subestaciones de distribución se ha basado en utilizar Relés No direccionales para los circuitos laterales y clientes 10 kV, en cambio para las redes troncales se va utilizar los Relés Direccionales, esto debido a la generación de corriente de retorno, el cual se presenta cuando existen fallas a tierra en otros alimentadores adyacentes pertenecientes a la misma barra de 10 kV de la subestación de transmisión.

Para la coordinación de la protección se está utilizando el modelo de curva tiempo definido, en la cual se toman dos criterios:

- La primera es utilizar la corriente de falla monofásica para la selección de la corriente sensitiva homopolar $I_{0>}$ para la detección de fallas de alta impedancia.
- La segunda es utilizar la corriente de doble falla a tierra para la selección de la corriente homopolar de cortocircuito $I_{0>>}$, estas son fallas de baja impedancia que es detectada por la función de protección sobrecorriente homopolar a tierra.

El criterio de seleccionar el recierre en los relés de protección para fallas a tierra son los siguientes:

- La red a reconectar deberá tener una longitud de 3 Km de red aérea.
- El recierre no deberá ser aplicado en zonas de corrosión severa ya que una falla a tierra genera sobretensiones, las cuales pueden dañar los aislamientos de los aisladores, seccionadores cut out, terminal exterior, conector de codo, bushing, flower de subestaciones compactas, etc.

La Provincia Constitucional Callao tiene dos zonas de contaminación salina demarcadas:

- Para zonas de corrosión moderada cuando se está alejada del mar 1 Km se debe utilizar Aisladores Híbridos tipo PIN (la base es de porcelana y el revestimiento polimérico) y aisladores poliméricos.

- Para zonas de corrosión severa cuando la red aérea esta alejada del mar 400 metros se debe utilizar cable autosoportado, como experiencia en una oportunidad se tenía instalado en la red aérea Aisladores híbridos en la zona de Bajada MARBELLA el cual estaba a una distancia de 400 metros del mar, al cabo de 8 meses cuando se realizo el mantenimiento preventivo se encontró descargas parciales en la manta del revestimiento polimérico.

En los años de 1995 a 1998 en las subestaciones aéreas se utilizaron Aisladores de Porcelana, Seccionador Cut Out de porcelana en zonas de moderada y severa contaminación, dichos materiales no eran los adecuados para este tipo de zona. Por lo que el mantenimiento preventivo y correctivo a las redes aéreas como: aisladores de porcelana de los transformadores aéreos, seccionador cut out, terminal exterior, aisladores y accesorios de la línea de tierra tenía que realizarse por lo menos cuatro veces al año con la finalidad de evitar interrupciones imprevistas.

En los años de 1999 a 2008 se han realizado el cambio de los materiales para zonas de alta contaminación, además con la implementación de la protección de falla a tierra en la red de distribución, se ha evitado tener interrupciones imprevistas con salidas totales de alimentadores por fallas a tierra ocasionados por falla en: Seccionador Cut Out, Aisladores de porcelana, línea caída, rama de arboles, cometa, aves, cable defectuoso, empalme defectuoso, choque de vehículo, defecto interno en las instalaciones de los clientes y cable dañado por terceros.

1.1 *Objetivo*

Analizar el mal comportamiento de los rele de Fallas a Tierra en las subestaciones de distribución de 10 kV en SET SANTA MARINA debido al ajuste inapropiado sin considerar factores como la corriente de retorno.

Reducir el índice de salidas totales de alimentadores por interrupciones imprevistas del Servicio Eléctrico causadas por fallas a tierra en la red de distribución de 10 kV y con ello disminuir los indicadores TIC (Tiempo Interrupción por cliente) y FIC (Frecuencia de Interrupción por cliente), cuyos resultados determinan la Calidad del Servicio.

Evitar el pago de compensaciones a los clientes a la entidad Supervisora del Servicio Organismo Supervisor de Inversiones de Energía (OSINERG) que se originan debido a las interrupciones del servicio eléctrico.

Para este trabajo se ha tomado como estudio a la Subestación de Transmisión ubicado en La Provincia Constitucional Callao en zona de extremada y severa corrosión.

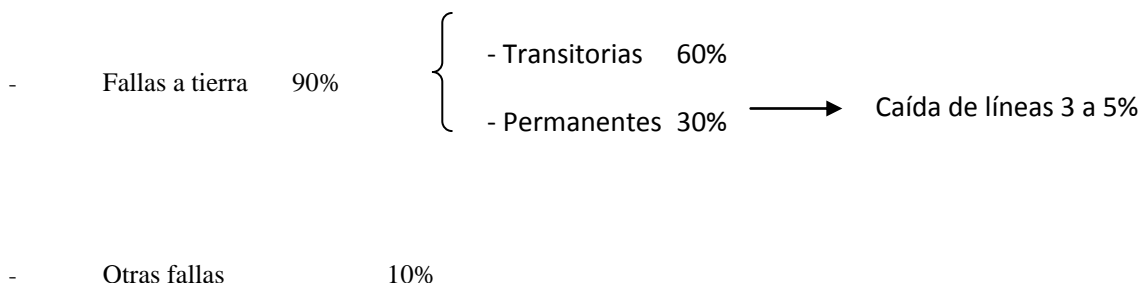
1.2 Justificación

El motivo del trabajo basa su desarrollo en la SET de Santa Marina en la provincia constitucional del Callao donde se ha colocado relés de fallas a tierra en la mayoría de alimentadores, el problema en el que se enfoca el estudio es cuando ocurren fallas a tierra las cuales debido a la corriente de retorno involucra a los otros alimentadores provocando interrupciones imprevistas innecesarias lo que conlleva en un aumento de los indicadores FIC y TIC.

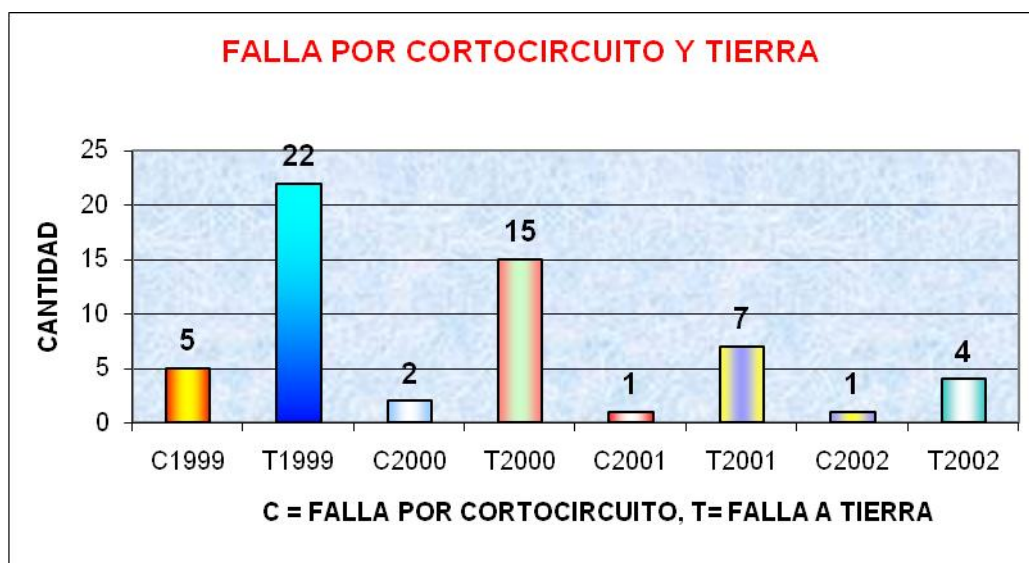
El problema de las fallas a tierra no tendría importancia si la distribución de la energía eléctrica fuera mediante cables subterráneos, sin embargo desde ya hace más de 20 años se viene utilizando cada vez más las líneas aéreas, lo que origina un peligro latente de riesgo eléctrico a las personas ante la caída a tierra de un conductor.

El ajuste inicial de los relés de protección se han llevado a cabo basándose en la coordinación de los relés en un mismo alimentador; no se han considerado los problemas que se originan cuando se producen fallas monofásicas a tierra que tiene repercusiones con los otros alimentadores no involucrados en la falla debido a la corriente homopolar de retorno.

La distribución porcentual del tipo de fallas para la zona de Lima según el registro de fallas imprevistas de la empresa EDELNOR que maneja el área de Análisis técnico aproximadamente es como sigue:



Como se ve las fallas a tierra son las fallas más comunes en un sistema de distribución y eso conlleva a fallas a tierra evolutivas que pueden complicar a otros alimentadores no involucrados en la falla lo que acarrea niveles de confiabilidad bajos y costos compensatorios a la empresa de distribución.



Estos datos significan que en la mayoría de casos en las redes de distribución las fallas mas comunes son las de tierra y en muchos casos esas fallas involucran indebidamente a otros alimentadores produciendo interrupciones imprevistas que afectan los indicadores de calidad del servicio, adicionalmente se debe poner en claro que no todas las zonas deben ser tratadas de la misma forma puesto que el grado de contaminación depende de su cercanía o no al mar, de eso depende que tipo de aisladores se deben utilizar para las redes teniendo desde aisladores cerámicos, poliméricos, híbridos o zonas donde es necesario el uso de cables autosoportados; la subestación Santa Marina esta ubicada en una zona de corrosión severa por lo que el tipo de aisladores de sus redes debe ser considerado.

1.3 Metodología

Para este trabajo se ha tomado como estudio a la Subestación de Transmisión ubicado en La Provincia Constitucional callao en Zona de Extremada y Severa Corrosión, tomando como datos las interrupciones imprevistas durante los últimos años de la zona en estudio.

La planificación, el diseño y la operación de los sistemas eléctricos de potencia, requiere de acuciosos estudios para evaluar su comportamiento, confiabilidad y seguridad. Estudios típicos que se realizan son: flujos de potencia, estabilidad, coordinación de protecciones, cálculo de cortocircuito, etc. Un buen diseño debe estar basado en un cuidadoso estudio en que se incluye la selección de voltaje, adecuado tamaño del equipamiento y selección apropiada de protecciones.

La mayoría de los estudios necesita de un complejo y detallado modelo que represente al sistema de potencia, generalmente establecido en la etapa de proyecto. Los estudios de cortocircuito son típicos ejemplos de éstos, siendo esencial para la selección de equipos, y el ajuste de sus respectivas protecciones.

Se considerará las bases de datos de interrupciones imprevistas en la SET de Santa Marina así como la topología de la red, se incluye en este trabajo la ubicación y relés de protección actuales de las diversas subestaciones de distribución pertenecientes a la SET de Santa Marina.

Para el cálculo de la capacitancia de todos los alimentadores de la subestación en estudio se ha tomado en cuenta el tipo de conductor en la zona, puesto que la red es compuesta por varios tipos de cable se ha considerado la siguiente tabla tomado como datos de la capacitancia en uF/Km.

Luego el cálculo se hará multiplicando para cada tipo de cable el valor característico de su capacitancia por la longitud de la red por tipo de cable y de esa manera obtenemos la capacitancia de cada alimentador la cual se detalla en el capítulo 5.5.

Para el cálculo de la corriente homopolar se toma en cuenta la capacitancia homopolar de los alimentadores no fallados y su reactancia.

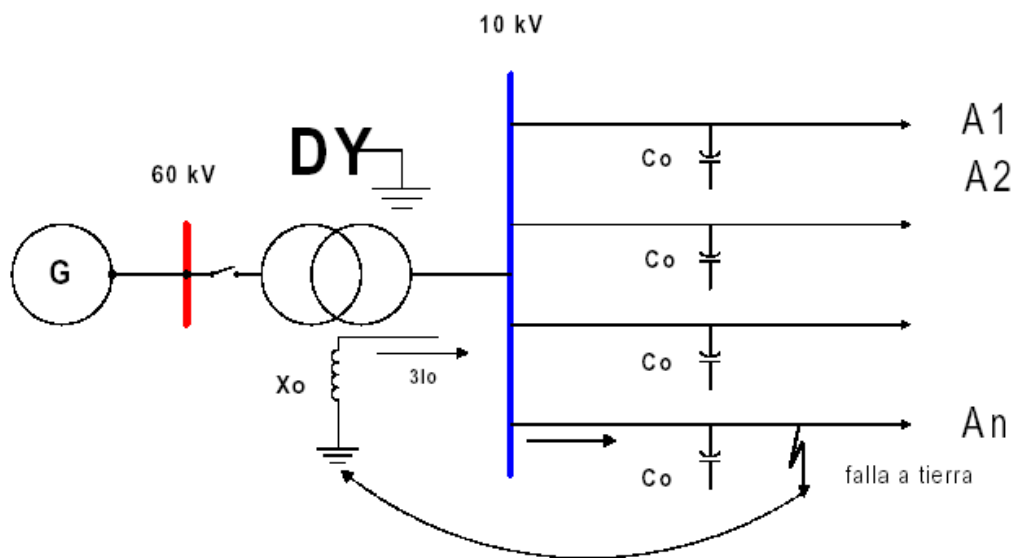
CABLE NKY	Co (uF/Km)
16	0,135
25	0,15
35	0,17
70	0,22
120	0,28
240	0,37
CABLE N2XSY	
16	0,135
25	0,15
35	0,17
70	0,22
120	0,28
240	0,37
LINEA AEREA Cu	
13	0,00364
16	0,00364
25	0,0037
35	0,00375
70	0,00384
LINEA AEREA AL	
70	0,00384
120	0,00393
125	0,00393
185	0,00255
240	0,00255
LINEA AEREA AS	
70	0,003844

II. MARCO CONCEPTUAL

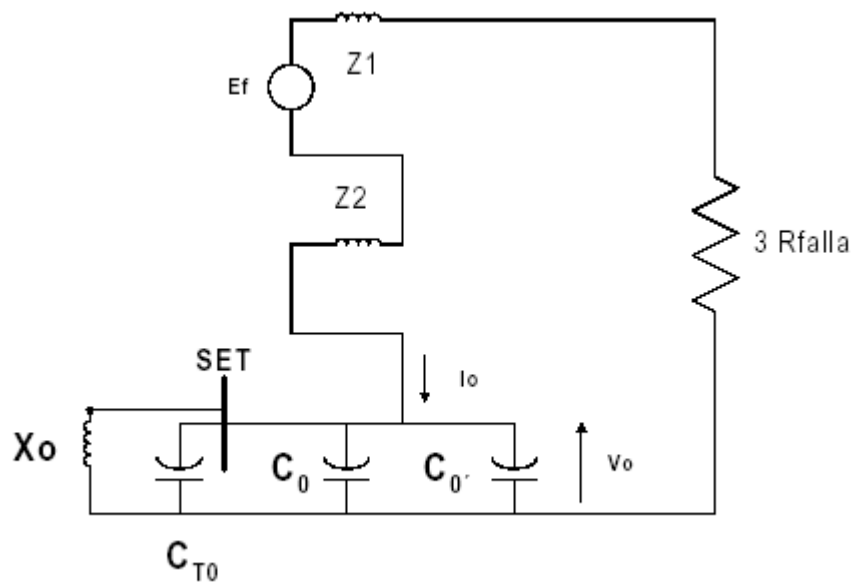
2.1 Sistema con Neutro Puesto a Tierra

El comportamiento de las corrientes homopolares en un sistema puesto a tierra se muestra a continuación, en esta se puede observar que debido al hecho de que el neutro del transformador de potencia esté puesto a tierra y que su reactancia homopolar sea mucho menor que la reactancia capacitiva homopolar de los alimentadores, al existir una falla a tierra, prácticamente toda la corriente homopolar retorna a la barra a través del neutro del transformador de potencia, existiendo corriente solo en el alimentador fallado y no en los otros alimentadores; es por esto que no se justifica la instalación de relés direccionales, en este caso es suficiente la instalación de relés no direccionales sensitivos de corriente homopolar.

Adicionalmente, en caso de utilizarse relés direccionales estos no operarían debido a que las tensiones homopolares generadas serían muy pequeñas, debajo del 1%, los relés direccionales necesitan de 3 a 5 % de tensión para poder polarizarse.



Su esquema ante falla monofásica es el siguiente:

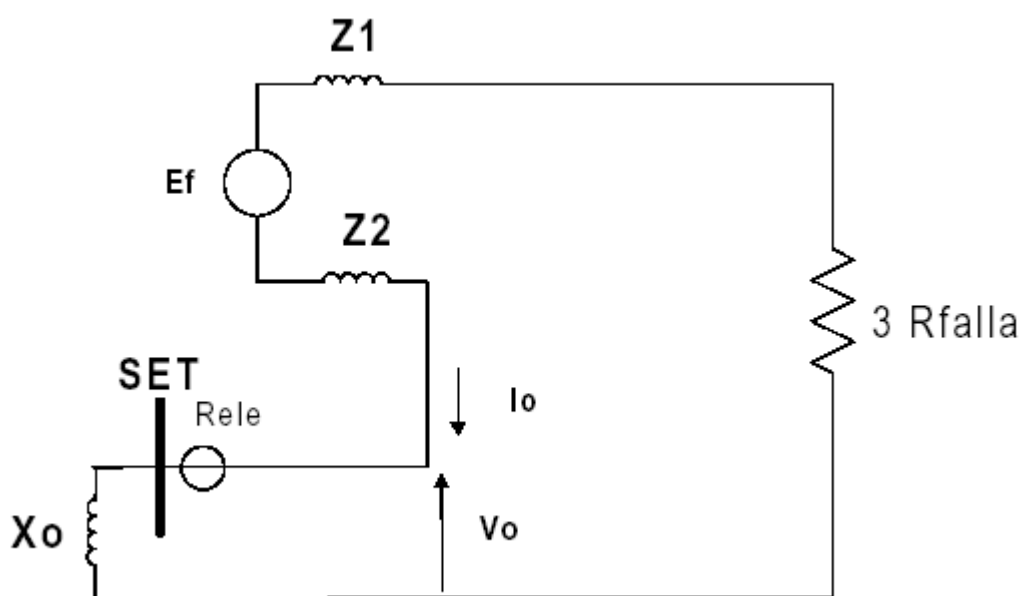


Donde:

C_{T0} = capacidad total homopolar de los alimentadores no involucrados en la falla

X_0 = reactancia homopolar del trafo de potencia generalmente $X_0 \ll X_{ct0}$

Luego podemos simplificar el circuito como sigue:



Donde:

$$I_o = \frac{E_f}{\sqrt{(3R_f)^2 + (Z_1 + Z_2 + X_o)^2}}$$

Z_1 = impedancia de secuencia positiva

Z_2 = impedancia de secuencia negativa

X_o = reactancia homopolar del transformador

R_f = resistencia de falla a tierra

Generalmente $Z_1 = Z_2 \approx X_o$

$$I_0 = \frac{E_f}{\sqrt{(3R_f)^2 + (3Z_1)^2}}$$

$$V_0 = I_o \cdot X_o$$

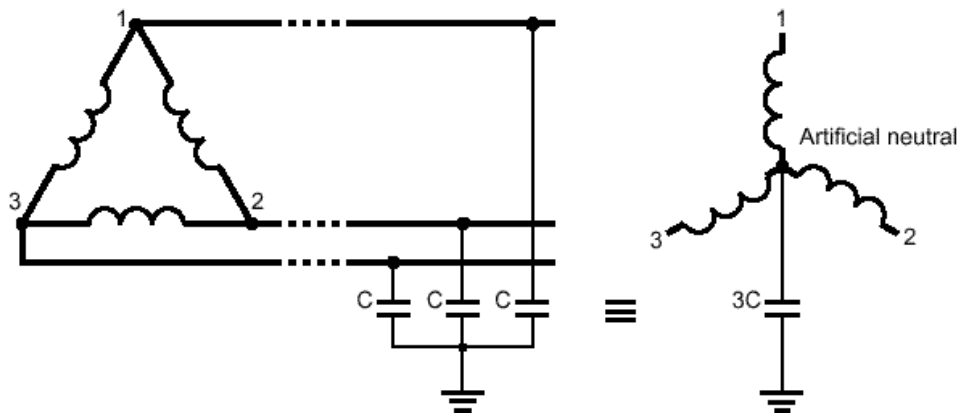
$$I_{rele} = 3I_o$$

2.2 Sistema Neutro Aislado

Un sistema aislado es aquel en el que no existe conexión intencional entre los conductores y tierra.

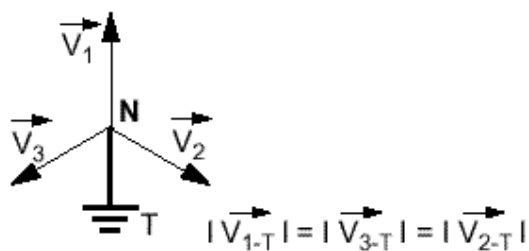
Sin embargo en todos los sistemas existe una conexión capacitiva entre los conductores del sistema y las superficies adyacentes que se encuentran a tierra.

Por lo tanto un sistema aislado es un sistema capacitivamente puesta a tierra por virtud de la capacitancia distribuida del sistema como se observa en la siguiente figura.



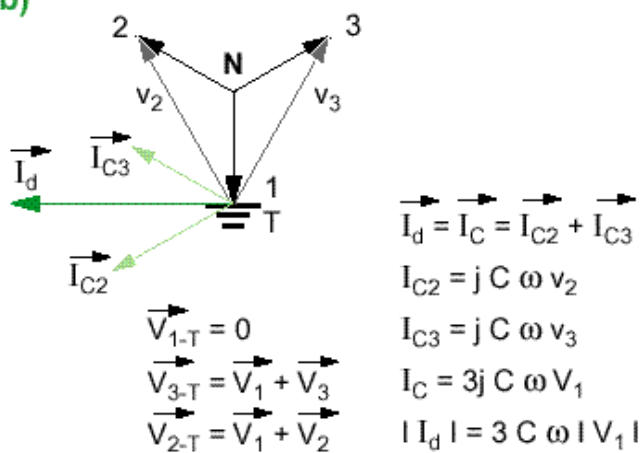
Durante condiciones normales de operación la capacitancia distribuida no presenta problemas, de hecho beneficia pues establece un neutro para el sistema de distribución, por lo tanto las tensiones fase a tierra son de 5700 voltios aproximadamente.

a)



En condiciones de falla a tierra en una fase, aparecen voltajes fase a tierra en las fases sanas de aproximadamente 10 kV, esto puede ocasionar fallas en los aislamientos de los accesorios de la red de distribución.

b)

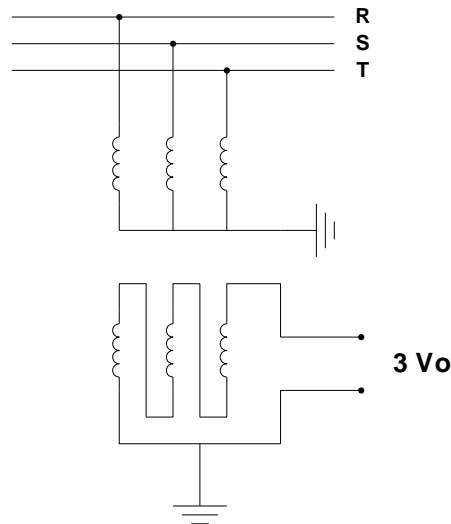


2.3 Detección de Parámetros

Para la detección de fallas a tierra en la red de distribución de 10 kV, se emplea los parámetros de tensión y corriente que continuación se detalla.

2.3.1 Tensión Homopolar

Para poder efectuar la detección de las tensiones homopolares en la red de distribución, se tiene que realizar la conexión delta abierto de los devanados de los transformadores de tensión como se muestra en la figura.

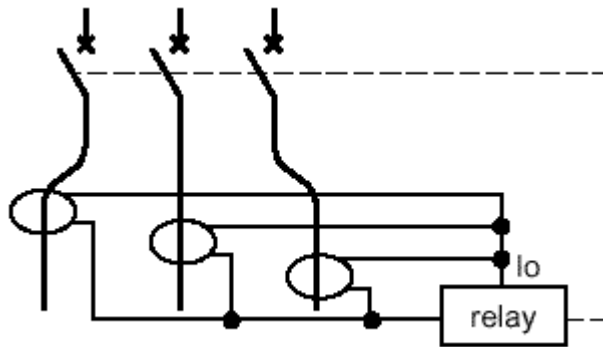


$$V_o = (V_R + V_S + V_T) / 3$$

2.3.2 Corriente Homopolar

Debido a que la corriente homopolar es muy pequeña en comparación con la corriente de carga del alimentador y si la detección de la corriente se efectúa a través de la suma de tres transformadores de corriente, es posible que el resultado del filtro homopolar sea:

- Una corriente debido a la diferencia de corrientes de excitación que daría como resultado operaciones incorrectas.
- El valor de la corriente sensitiva a tierra sería muy alta, por lo cual no detectaría fallas a tierra de alta impedancia.



$$I_o = (I_r + I_s + I_t)/3$$

La corriente de excitación de los transformadores de corriente influirían en la medición del rele de protección tal como veremos en la siguiente formula:

$$I_{rele} = (I_r - I_{exr}) + (I_s - I_{exs}) + I_t - I_{ext}$$

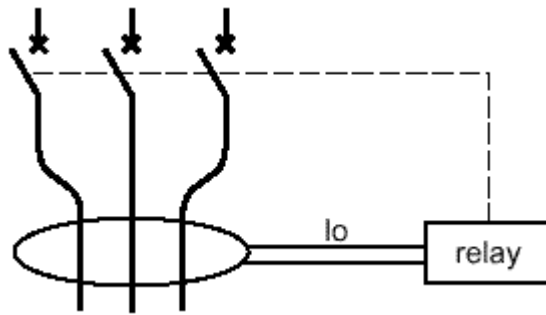
$$I_{rele} = (I_r + I_s + I_t) - (I_{exr} + I_{exs} + I_{ext})$$

Si el sistema no tiene falla a tierra la corriente en el rele será:

$$I_{rele} = -(I_{exr} + I_{exs} + I_{ext})$$

Esta corriente puede originar operaciones incorrectas en el relé.

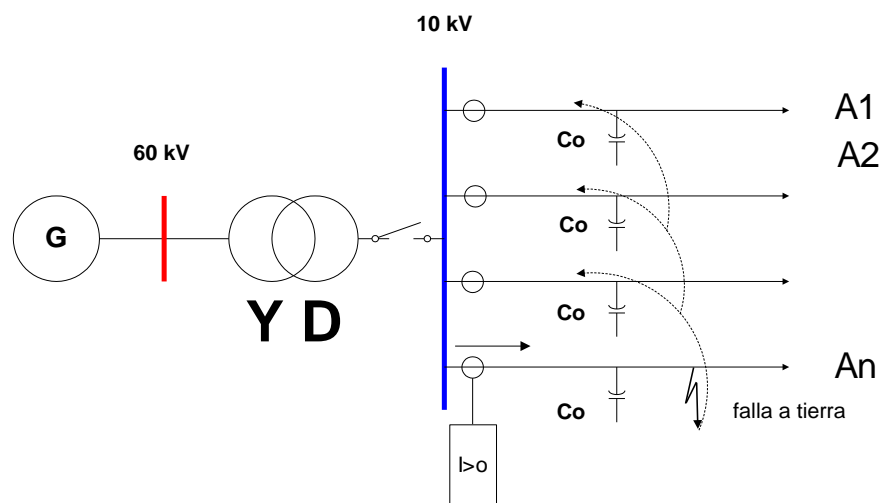
Para solucionar este problema debemos efectuar la suma de las tres corrientes dentro de un solo núcleo magnético, lo cual da como resultado una corriente en el secundario del transformador siempre. Para poder introducir las tres fases dentro de un núcleo magnético la única forma es a través de un transformador toroidal.



$$I_{rele} = (I_r + I_s + I_t) - I_{ex}$$

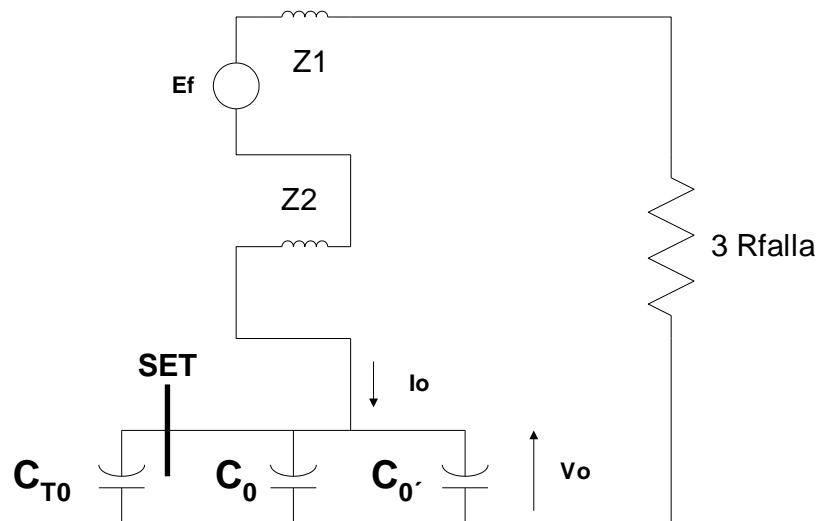
2.4 Definición de Falla Monofásica a Tierra

En la figura siguiente se muestra el comportamiento de las corrientes homopolares en un sistema de distribución de 10 kV con neutro aislado ante una falla a tierra.



En el alimentador An con la falla a tierra existe una corriente homopolar desde la barra del SET hacia la falla. Debido a que la conexión en delta del transformador de potencia aísla al transformador del sistema de distribución, esta corriente tiene que regresar a la barra a través de los otros alimentadores y de sus capacidades homopolares teniendo una dirección contraria.

La figura siguiente muestra la conexión de las redes de secuencia para una falla a tierra en un sistema neutro aislado. El circuito equivalente para el análisis de este tipo de fallas será efectuado de acuerdo a la Teoría de las Componentes Simétricas.



$Z1$ = Impedancia Secuencia Positiva de la fuente y el alimentador

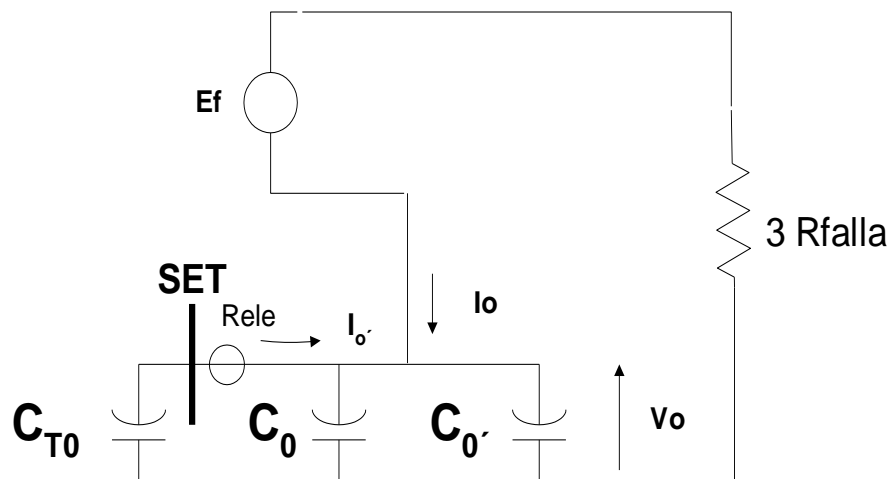
$Z2$ = Impedancia Secuencia negativa de la fuente y el alimentador

R_{falla} = Resistencia Falla a Tierra

C_{T0} = Capacidad total homopolar de los alimentadores no Involucrados en la falla.

C_0, C_0' = Capacidad a ambos extremos del punto de falla en el alimentador Involucrado

La capacitancia homopolar de los alimentadores determina la impedancia cero de la red, estas son muchos mayores que las impedancias secuencia positiva, negativa y cero del alimentador.



Donde:

$$I_o = \frac{Ef}{\sqrt{(3Rf)^2 + \frac{1}{w^2(C_{To} + Co + Co')^2}}}$$

La corriente homopolar del rele es:

$$I'_o = I_o \frac{C_{To}}{C_{To} + C_o + C_o'}$$

En una S.E. con varios alimentadores donde

$$C_{To} \gg C_o' + C_o \dots \dots \dots I'_o \approx I_o$$

$$I'_o = \frac{Ef}{\sqrt{(3Rf)^2 + \frac{1}{(wC_{To})^2}}}$$

$$V_o = \frac{I'_o}{wC_{To}}$$

2.5 *Calculo de cortocircuito monofásico a tierra.*

Para el cálculo de corrientes de cortocircuito, la norma IEC 60909-0 distingue entre generador cercano y lejano como también, entre la geometría del sistema, es decir, entre redes radiales y en anillo. En general para sistemas de distribución industrial, se utilizan configuraciones radiales, por tal motivo solo se tratarán estos sistemas.

El valor de la corriente de cortocircuito es la suma de la componente simétrica AC y la componente transitoria DC.

La corriente de cortocircuito calculada para generadores cercanos, presenta la componente simétrica que decae con la constante de tiempo, mientras que para generadores lejanos, la componente DC se asume constante. En particular, la norma IEC 909 define el cálculo de las siguientes corrientes:

- **I_K''** Corriente inicial simétrica RMS.
- **i_p** Valor peak.
- **I_b** Corriente de cortocircuito simétrica de interrupción en un instante *t_m*, para separación del contacto del interruptor.
- **I_{b sym}** Corriente asimétrica de interrupción RMS.
- **I_K** Corriente en régimen permanente de cortocircuito RMS.

2.5.1 Cálculo de la corriente inicial simétrica.

El método consiste en una aproximación obtenida usando el principio de superposición. Para ello, no se considera el estado previo a la falla y se asume una fuente equivalente de voltaje *cV_n* en la barra de falla. El factor *c* del voltaje se asume de acuerdo con el valor del voltaje y es igual:

c = 1 en baja tensión, 230/400V 50 Hz.

c = 1.05 para otros valores de baja tensión.

c = 1.1 en media tensión.

El otro factor es *K_G* que siempre se calcula con la impedancia del generador, dado por la expresión siguiente.

$$Z_{GK} = K_G \cdot (R_G + j \cdot X_G'')$$

Donde:

R_G es el valor ficticio de resistencia, asumido por el standard en función de la reactancia subtransitoria para diferentes voltajes y potencias de generadores.

La corriente inicial alterna de cortocircuito *I_K''* se calcula mediante la ecuación siguiente:

$$I_K'' = \frac{c \cdot V_n}{\sqrt{3} \cdot Z_K} = \frac{c \cdot V_n}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{R_K^2 + X_K^2}}$$

Donde *Z_K* es la impedancia equivalente de la barra vista desde la falla. Este valor incluye las impedancias de las máquinas rotatorias solamente cuando se produce una falla en proximidad al generador.

Se utilizan fórmulas separadas para el cálculo de las corrientes *i_p*, *i_{b asym}*, *I_K* porque su relación con *I_K* difiere del tiempo considerado en la corriente de cortocircuito y la influencia de contribuciones de máquinas de inducción y/o generadores. Los estándar proveen diferentes aproximaciones de acuerdo con la configuración de la red, radial o anillo y ubicación de la falla.

2.5.2 Cálculo de I_p

La IEC recomienda el cálculo por separado, en cada rama de la razón X/R. Para luego calcular la corriente máxima I_p . Para ello, es necesario distinguir para el caso de redes radiales o en anillo.

Redes radiales: la I_p se calcula como la suma de las contribuciones I_{pi} de cada rama convergiendo a la barra de falla. Cada I_{pi} es calculado en función de $I_{K''}$ como se muestra en la expresión abajo.

$$i_{pi} = \sqrt{2} \cdot K_i \cdot I_{Ki}''$$

Donde K_i depende de la razón X/R correspondiente a cada elemento. Cabe destacar que no existen un método general para el cálculo; por ejemplo para redes de baja tensión se calcula mediante la expresión.

Estos valores también se pueden obtener mediante el uso de gráficos.

$$K_i = \sqrt{2} \cdot \left(1.02 + 0.98 \cdot e^{\frac{-3 \cdot R}{X}} \right)$$

2.5.3 Cálculo de I_B

En el caso de corrientes de cortocircuito para fallas lejos del generador e independiente de la estructura de la red, esta norma sugiere que $I_b = I_{K''} = I_K$.

En el caso de que el cortocircuito se establezca cerca del generador, es necesario distinguir entre redes radiales o en anillo.

Redes radiales: I_b se expresa como la suma de las diferentes contribuciones I_{bi} como lo expresa la ecuación (3.14).

$$I_{bi} = \mu(t)_i \cdot q_i \cdot I_{Ki}''$$

El factor $\mu(t)_i$ se determina mediante fórmulas o gráficos, siendo función del mínimo tiempo (t_m) de apertura o cierre del interruptor, $I_{K''}$ e I_{ri} . Los valores de t_m considerados son de 0.02, 0.05, 0.1 y 0.25 segundos, para cada uno de ellos (t_m) se presenta una fórmula para determinar el valor de $\mu(t)$.

$$\mu(t) = 0.84 + 0.26 \cdot e^{-\frac{I_{K''}}{I_{ri}}}$$

La expresión anterior se aplica para un $t_m = 0.02$ segundos y para una falla cerca del generador.

I_{ri} es el valor de corriente relativa de la máquina (Generador) para la rama i th ; en sistemas alimentados externamente $i = 1$.

El factor $q_i = 1$ a menos que en la rama exista un motor de inducción. En el caso que exista, $q_i < 1$ y es función de t_m y del número de pares de polos.

2.5.4 Cálculo de IbASYM

La corriente asimétrica de interrupción es calculada mediante la expresión

$$i_{b \text{ asym}} = \sqrt{I_b^2 + I_{DC}^2}$$

La componente I DC se evalúa en el instante tm por la siguiente fórmula.

$$I_{DC} = \sqrt{2} \cdot I_K'' \cdot e^{-\frac{2\pi f \cdot tm \cdot R}{X}}$$

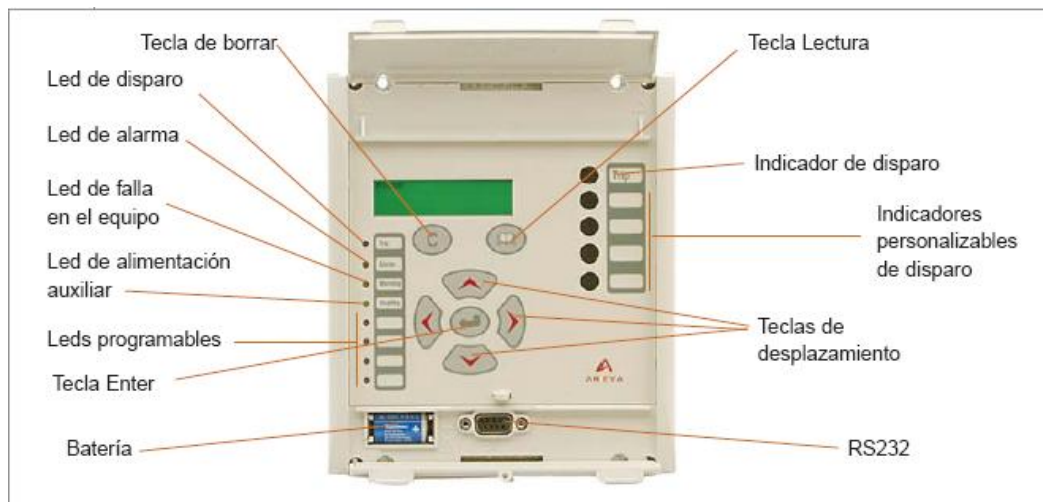
donde la razón X/R es diferente en redes radiales o en anillo.

Redes radiales : a cada rama se aplica la relación X/R.

$$I_{DC} = \sum I_{DCi}$$

2.6 Relé de Protección

2.6.1 Relé Micom P124

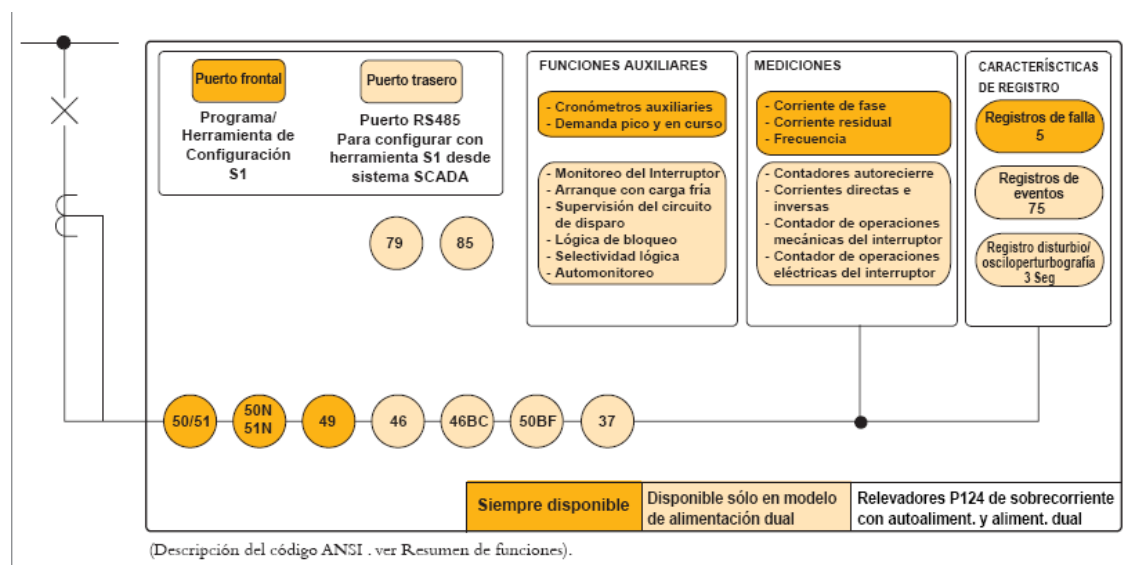


Falla a tierra temporizada (51N)

La detección de falla a tierra es idéntica a la detección de sobrecorriente de fase temporizada. Se pueden seleccionar tres etapas de falla a tierra independientes. Para la primera etapa, el usuario puede seleccionar ya sea cualquiera de las 14 familias de curvas y valores TMS o una configuración de tiempo definido. El rango de falla a tierra puede programarse de 0.002 a 40 veces la corriente nominal a tierra, para permitir una máxima sensibilidad para la detección de la misma. La corriente a tierra, se genera ya sea por un núcleo de Transformador de Corriente de suficiente potencia o por una conexión residual de los TC de tres líneas.

Falla a tierra instantánea (50N)

En cuanto a fallas de fase, los relevadores MiCOM P124 generan datos instantáneos para cada etapa de falla a tierra, con las mismas características. Para el modelo de alimentación dual, el usuario puede asignar etapas instantáneas de falla a tierra a contactos de salida, así como a cuatro LEDs y cuatro indicadores magnéticos localizados en el panel frontal.



2.7 Selección de los equipos de protección

2.7.1 Transformadores de Tensión

Sean las tensiones nominales del sistema y del relé las siguientes:

Tensión nominal del sistema = 10 kV

Tensión nominal del Relé = 110 V

Luego la relación de transformación de cada unidad monofásica deberá ser la siguiente considerando que necesitamos dos devanados secundarios una para la medición del sistema y otro para la detección de la tensión homopolar.

$$\frac{10}{\sqrt{3}} \bigg/ \frac{0.11}{\sqrt{3}} \bigg/ \frac{0.11}{3} \text{ kV}$$

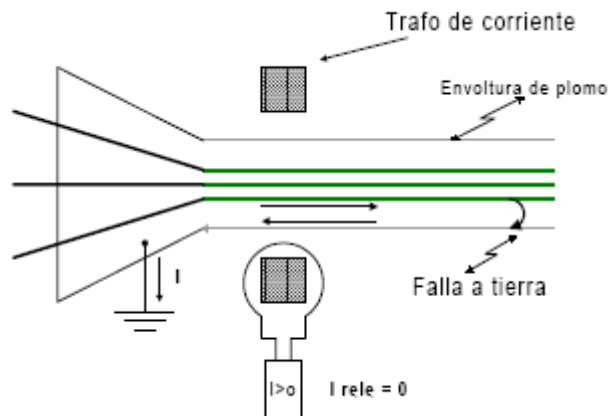
2.7.2 Transformadores de Corriente

La selección de la relación de transformación del transformador de corriente toroidal seccionable se realiza considerando una resistencia de falla de cero ohmios ($R_{\text{falla}} = 0 \text{ ohm}$), con la finalidad de obtener la mayor corriente posible

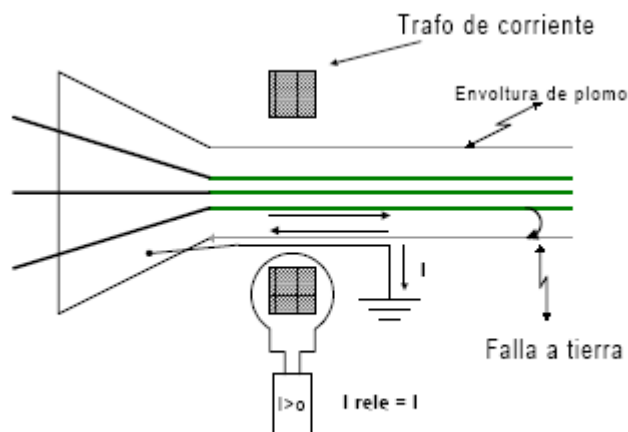
$$I_o = \frac{E_f}{\frac{1}{wC_{\tau 0}}}$$

$$I_{\text{trafo}} = 3I_o \quad \dots \quad (200 / 1A)$$

El montaje de los transformadores de corriente toroidal seccionable debe efectuarse de una forma muy especial debido a que los cables con funda de plomo, NKY, normalmente tienen corrientes homopolares en estas y pueden dar falsas operaciones al relé direccional de sobrecorriente homopolar. En otro caso, por ejemplo si existe una falla a tierra en el cable el relé no detectaría la corriente si la conexión fuese la siguiente :



Para evitar todos estos inconvenientes, la puesta a tierra de la cabeza terminal de cable debe pasar por el transformador de corriente toroidal, tal como se indica a continuación:



2.8 *Aisladores*

2.8.1 *Condiciones generales*

Los conductores empleados en líneas aéreas, en la mayor parte de los casos, son desnudos; por lo tanto, se necesita aislarlos de los soportes por medio de aisladores, fabricados generalmente con porcelana o vidrio. La sujeción del aislador al poste se realiza por medio de herrajes. Pero además, un aislador debe tener las características mecánicas necesarias para soportar los esfuerzos a tracción a los que está sometido.

Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto, las cualidades específicas que deben cumplir los aisladores son:

- Rigidez dieléctrica suficiente para que la tensión de perforación sea lo más elevada posible. Esta rigidez depende de la calidad del vidrio o porcelana y del grueso del aislador. La tensión de perforación es la tensión a la cual se cebe el arco a través de la masa del aislador.
- Disposición adecuada, de forma que la tensión de contorneamiento presenta valores elevados y por consiguiente no se produzcan descargas de contorno entre los conductores y el apoyo a través de los aisladores. La tensión de contorneamiento es la tensión a la que se cebe un arco a través del aire siguiendo la mínima distancia entre fase y tierra, es decir, el contorno del aislador. Esta distancia se llama línea de fuga.
- Resistencia mecánica adecuada para soportar los esfuerzos demandados por el conductor, por lo que la carga de rotura de un aislador debe ser cuanto menos igual a la del conductor que tenga que soportar.
- Resistencia a las variaciones de temperatura.
- Ausencia de envejecimiento.

Los aisladores son, de todos los elementos de la línea, aquellos en los que se pondrá el máximo cuidado, tanto en su elección, como en su control de recepción, colocación y vigilancia en explotación. En efecto, frágiles por naturaleza, se ven sometidos a esfuerzos combinados, mecánicos, eléctricos y térmicos, colaborando todos ellos a su destrucción. Todo nuevo tipo de aislador necesita ser confirmado por un uso muy prolongado, dada la imperfección de nuestro conocimiento en esta materia.

2.8.2 *Materiales empleados en los aisladores*

- Aisladores de porcelana
- Aisladores de vidrio
- Aisladores de esteatita y resinas epoxi

2.8.2.1.- *Aisladores de porcelana*

Su estructura debe ser homogénea y, para dificultar las adherencias de la humedad y polvo, la superficie exterior está recubierta por una capa de esmalte. Están fabricados con caolín y cuarzo de primera calidad. La temperatura de cocción en el horno es de 1400° C.

En alta tensión, los aisladores son de dos, tres o más piezas unidas con yeso. Esto se debe a que solamente se consigue una cocción buena cuando su espesor no excede de 3 cm.

2.8.2.2.- Aisladores de vidrio

Están fabricados por una mezcla de arena silícea y de arena calcárea, fundida con una sal de sodio a una temperatura de 1300 °C, obteniéndose por moldeo. Su color es verde oscuro. El material es más barato que la porcelana, pero tienen un coeficiente de dilatación muy alto, que limita su aplicación en lugares con cambios grandes de temperatura; la resistencia al choque es menor que en la porcelana. Sin embargo, debido a que el coste es más reducido y su transparencia facilita el control visual, hacen que sustituyan en muchos casos a los de porcelana.

2.8.2.3.- Aisladores de esteatita y resinas epoxi

Se emplean cuando han de soportar grandes esfuerzos mecánicos, debido a que su resistencia mecánica es aproximadamente el doble que la de la porcelana, y sus propiedades aislantes también son superiores; sin embargo, el inconveniente que tienen es el de ser más caros.

2.8.3.- Tipos de aisladores

- Aisladores fijos
- Aisladores en cadena o suspendidos
- Aisladores especiales

2.8.3.1.- Aisladores fijos

Están unidos al soporte por un herraje fijo y no pueden, por consiguiente, cambiar normalmente de posición después de su montaje. Su forma general es la de una campana que lleva en su parte superior una garganta sobre la que se fija el conductor por una ligadura (de hilo de cobre recocido para conductores de cobre o de hilo de aluminio para conductores a base de aluminio). El vástago está empotrado en su interior y queda debajo de la campana. Este vástago puede ser recto o en forma de cuello de cisne. Se pueden encontrar aisladores con el interior roscado para atornillarlo a la parte superior del vástago, disposición que facilita la sustitución de un aislador defectuoso, evitando desmontar el vástago.

El aislador fijo más simple es el de las líneas telefónicas, o el de las líneas de baja tensión (Modelo ARVI-12). Cuando la tensión es más alta, se acostumbra a prolongar la línea de fuga dando a la campana ondulaciones profundas e inclinadas hacia abajo; cuando el tamaño del aislador es grande o la campana es complicada, no puede fabricarse de una sola pieza, por lo que debe estar constituida por la unión de 2, 3 ó 4 campanas superpuestas, unidas por yeso o cemento (modelo ARVI-32).

Los mayores aisladores fijos corresponden a una tensión de servicio de 63 kV. Pueden ser de porcelana o vidrio.

2.8.3.2.- Aisladores en cadena o suspendidos

Están constituidos por un número variable de elementos según la tensión de servicio; estas cadenas son móviles alrededor de su punto de unión al soporte, y además, las articulaciones entre elementos deben tener bastante libertad para que los esfuerzos de flexión queden amortiguados; estas articulaciones suelen ser de rótula.

Este tipo de aislador es el más empleado en media y en alta tensión, ya que presenta las siguientes ventajas:

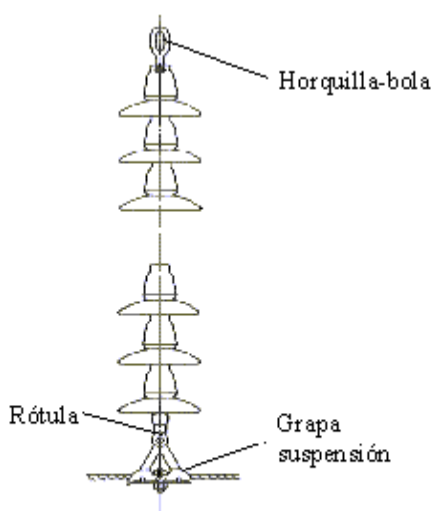
- Permite elevar la tensión de funcionamiento con sólo aumentar la longitud de la cadena, es decir, colocando más elementos.

- No se interrumpe el servicio por rotura de un aislador, ya que la cadena sigue sustentando al conductor.
- Presenta una gran economía en la reparación de las cadenas, pues solamente es necesario cambiar el elemento averiado.

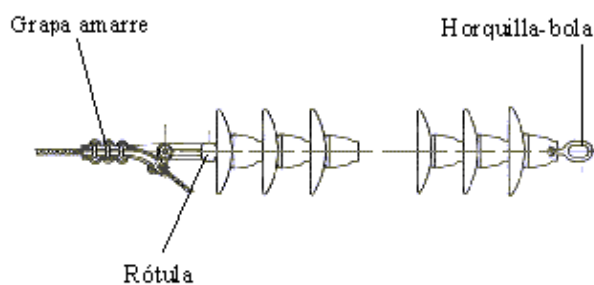
Existen diversos tipos de aisladores de cadena, que a continuación estudiamos:

a) Caperuza-vástago: Este aislador se compone de una campana de porcelana o vidrio, en forma de disco y que lleva en su parte inferior algunas ondulaciones. En la parte superior de la campana está empotrada una caperuza de fundición o acero, y en su parte inferior en un hueco bastante reducido, lleva un vástago sellado al aislador. Vástago y caperuza se adaptan uno y otro por una articulación de rótula, formando de esta forma una cadena tan larga como se quiera. Se fabrican en porcelana o en vidrio templado. Existen numerosos modelos con diversas características eléctricas y mecánicas.

La figura siguiente nos muestra la disposición de los aisladores en una cadena de suspensión o en una cadena de amarre.



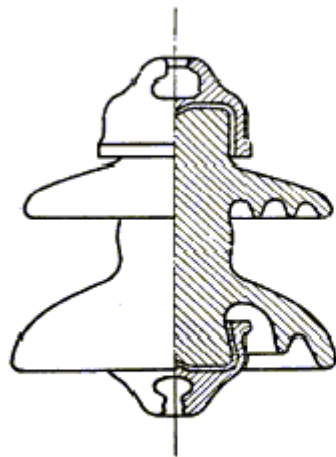
Aislador en cadena de suspensión



Aislador en cadena de amarre

b) Motor: Este elemento está constituido por un núcleo cilíndrico de porcelana de diámetro comprendido entre 60 y 85 mm., y provisto de dos faldas anchas; en los dos extremos están empotrados dos caperuzas análogas a las de los aisladores caperuza-vástago. La unión de los aisladores Motor entre sí se hace con un pequeño vástago cilíndrico terminado en dos rótulas.

La diferencia esencial entre el aislador Motor y el elemento caperuza-vástago reside en el hecho de que el primero es rigurosamente imperforable en servicio, mientras que el segundo puede, en ciertas circunstancias, perforarse antes de ser contorneado, especialmente por la acción simultánea de esfuerzos mecánicos y acciones eléctricas.



Aislador Motor



Aislador Langstab

c) Langstab : Este modelo es una ampliación del aislador Motor y se denomina Langstab (larga línea de fuga). Está constituido por un largo cilindro de porcelana de 80 a 100 cm., con ondulaciones bastante profundas y terminado en dos caperuzas.

2.8.3.3.- Aisladores especiales

a) Antiniebla: Su principal característica consiste en tener ondulaciones más profundas que permitan una mayor tensión de contorneamiento.

b) De costa: La campana exterior es más ancha y alta, de forma que protege completamente contra el rocío a las faldas interiores. Los depósitos de humedad (niebla, rocío, condensación de origen variable) lo mismo que el depósito de cuerpos conductores extraños (humos industriales) reducen considerablemente la tensión de contorneamiento de los aisladores. Cuando se combinan las dos acciones, llegan a impedir la explotación de la red a su tensión nominal. Se impone un aumento del nivel de aislamiento, o la utilización de aisladores de un calibre superior al que sería estrictamente necesario en circunstancias normales. La protección más difícil de realizar es la de líneas en regiones industriales, pues los depósitos contaminantes se introducen en todas las canaladuras del aislador, donde son llevadas a veces por la misma humedad.

III. MEDIO AMBIENTE DE TRABAJO

Para este trabajo se ha tomado como estudio a la Subestación de Distribución del SET SANTA MARINA ubicado en La Provincia Constitucional Callao.

3.1 *Definiciones*

SET: Subestación de Transmisión

SED: Subestación de Distribución. Puede ser del tipo Convencional, Compacta o Aérea

N.A: Normalmente Abierto

Tramo: Es el conductor aéreo o subterráneo de sección uniforme.

Enlace: Es el conductor aéreo o subterráneo que une en forma física dos subestaciones.

Circuito: Recorrido eléctrico formado por uno o varios enlaces. Generalmente, el circuito toma el nombre de la primera y la última subestación.

Lateral: Circuito que se deriva de una troncal para alimentar una o varias subestaciones de distribución.

Auxiliar: Recorrido eléctrico que une dos circuitos diferentes. El auxiliar puede ser entre dos alimentadores de una misma SET o de SET diferentes.

Troncal: Circuito principal que transporta la mayor cantidad potencia.

Alimentador: Es un conjunto de subestaciones de distribución

Red radial: Está compuesta de circuitos en donde el flujo de corriente sólo puede ir en un solo sentido.

Red enmallada abierta: Son circuitos que salen de una misma SET (fuente) y están unidos en dos a más puntos normalmente abiertos.

3.2 *Topología de la Red MT*

La SET Marina cuenta con 21 alimentadores de 10 kV, cada alimentador cuenta con un número determinado de subestaciones de distribución.

Las Subestaciones de distribución son: Convencionales de Superficie o Subterráneo, Compacta tipo Pedestal o Bóveda y Grupos Aéreos.

La cantidad de clientes en baja y media tensión son:

Clientes MT 20

Clientes BT 50, 000

La longitud de redes subterránea y aérea en Km es:

Alimentador	Longitud Red Subterranea (Km)	Longitud Red Aerea (Km)	Longitud Total (Km)
F 01	11.089	2.848	13.937
F 03	4.212	2.805	7.017
F 04	8.584	3.225	11.809
F 05	1.76	2.505	4.265
F 06	1.6	0	1.6
F 07	7.091	2.277	9.368
F 08	4.474	0	4.474
F 09	4.6	2.716	7.316
F 11	4.016	2.497	6.513
F 12	1.282	4.382	5.664
F 14	10.891	1.632	12.523
F 16	2.59	3.275	5.865
F 17	6.423	2.83	9.253
F 18	7.716	3.799	11.515
F 19	5.791	4.594	10.385
F 18	3.588	0.022	3.61
Total	85.707	39.407	125.114

El circuito troncal es de dos secciones (240mm² y 120 mm²) para redes subterráneas; y de sección uniforme (240mm²) para redes aéreas. La longitud promedio del circuito troncal es de 5 Km, los circuitos laterales son de sección uniforme de 70 mm².

IV. PROBLEMATICA DE LAS FALLAS A TIERRA EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN DE 10 KV (REDES AISLADAS A TIERRA)

Esta zona esta ubicada muy cercana del mar, los materiales que se utilizo en la red de distribución aérea de media tensión tuvieron problemas en su performance las sales: la brisa marina, el polvo y el industrial ocasionó descargas superficiales en los aisladores de porcelana, en los Seccionador Cut_Out clase 15 kV y en los bushing de los transformadores aéreos.

Estudios experimentales llevados a cabo por empresas consultoras en la Ciudad Lima para determinar la resistencia a la corrosión de los conductores y accesorios de la red aérea de distribución recomiendan tomar en consideración lo siguiente:

- Zona de contaminación “Extremada” de 0 a 400 m
- Zona de contaminación “Severa” de 400 a 1000 m
- Zona de contaminación “Moderada” superior a 1000 m

La sal contamina los aisladores produciéndose descargas superficiales más o menos severas de acuerdo al tipo y clase de aislador.

4.1 *Topología de la Red MT*

El nivel de contaminación se cuantifica por la cantidad de miligramos de sal que se acumula, en cierto tiempo, en un centímetro cuadrado de la superficie del aislador, a esta cantidad se le conoce como Densidad Equivalente de sal depositada (DESD).

Nivel de Contaminacion	DESD (mg/cm ²)
Muy ligera	< 0.03
Ligera	0.03 - 0.06
Media	0.06 - 0.12
Alta	0.12 - 0.24
Muy Alta	0.24 - 0.48
Excepcional	> 0.48

En general la superficie inferior del aislador se contamina más que la superior, incrementándose esta diferencia a medida que aumenta el periodo de exposición.

Los aisladores híbridos tipo pin tienen el nivel de contaminación alta, en cambio los aisladores poliméricos del tipo suspensión tienen el nivel de contaminación alta.

4.2 *Análisis Químico* (Agentes contaminantes en aisladores)

El análisis químico que se realiza a los contaminantes que se depositan sobre la superficie de los aisladores, cumple un objetivo dual, por un lado identifica las fuentes de contaminación y por otro permite conocer la severidad de una zona determinada.

MATERIA SOLUBLE.- Es llamada comúnmente SAL, es la que permite la conducción eléctrica de fase a tierra a través de la superficie del aislador. Existen tres tipos de Sal: Marina, Polvo e industrial.

MARINA – Contaminación natural formada por partículas presentes en las sales del mar (principalmente cloruro de sodio, NaCl), provenientes de la brisa del mar.

INDUSTRIAL – Contaminación artificial compuesta de partículas producto del deshecho de actividades industriales, los desechos que arroja sobre las líneas y subestaciones aéreas ocasionan altos niveles de contaminación, además dichos desechos se adhieren fuertemente a la superficie de los aisladores.

POLVO – Contaminación casi natural debida a partículas de la erosión de las rocas, el polvo fino del suelo.

4.3 *Efecto de la contaminación en los aisladores*

En Lima la ocurrencia de descargas superficiales por contaminación es causada por la acumulación de contaminantes como el polvo, sal marina seguida por niebla, llovizna, alta humedad.

La resistencia superficial de un aislador como se ve afectada por el depósito forman capas conductoras continuas cuando hay humedad, las corrientes de descarga superficial fluyen por estas capas.

Los compuestos solubles, se convierten en conductores de la electricidad cuando se humedecen, cuya etapa final es el flameo, el voltaje al cual ocurre este depende de la cantidad de las sales.

4.4 *Ubicación de las zonas de corrosión severa*

Las habilitaciones que a continuación se detallan están comprendidas dentro de la faja de corrosión severa.

FUNDO MARQUEZ, MAR BRAVA, LA CHALACA, SARITA COLONIA, CALLAO CENTRO, LA PERLA, TERMINAL MARITIMO, CALLAO HISTORICO, TIWINZA, Y BARRIO FRIGORIFICO, TELMO CARBAJO.

V. APORTES DEL INVESTIGADOR

5.1 *Materiales para zona de alta contaminación*

Se detalla la utilización de los materiales normalizados para las zonas de extrema y severa contaminación:

5.1.1 *Zonas de contaminación severa.*

En zonas hasta 400 metros de distancia del mar, la contaminación es severa se define la utilización de los siguientes equipos y materiales:

- Cable Autoportado de aluminio aislado con polietileno reticulado 8,7 / 15 kV
- Empalmes Derechos Unipolares resistentes a los rayos ultravioletas.
- Terminales elastoméricos de 600 mm de línea de fuga.



- Ferretería de fierro galvanizado en caliente con aplicación del compuesto anti corrosivo para los pernos y tuercas.
- Extensores de línea de fuga para bushing de transformadores, uno por cada bushing.
- Aislador Extensor de línea de fuga de 700 mm para instalarse con el Fusible Seccionador Cut Out clase 25 kV. Se aplicara un mastic termocontraible sobre las partes metálicas entre el Cut _Out y el aislador y entre el aislador y la abrazadera que va a la cruceta, finalmente se aplicara el compuesto anticorrosivo a los pernos y tuercas.

5.1.2 *Zona de corrosión severa (desde 400 metros a 1 Km)*

En zona desde 400 metros hasta 1 Km de distancia del mar, zona de corrosión severa se define la utilización de los siguientes equipos y materiales:

- Conductor de aleación de aluminio
- Aisladores polimericos: híbridos tipo PIN clase 15 kV y aisladores polimericos clase 25 kV ambos de 700 mm de línea de fuga.
- Ferrería: Grapas de aleación de aluminio, los pernos y varillas roscadas de acero galvanizado en caliente considerando la aplicación del compuesto antiadherente normalizado.
- Extensores de línea de fuga para bushing de transformadores, uno por cada bushing, teniendo cuidado de su selección adecuada.
- Aislador Extensor de línea de fuga de 700 mm para instalarse con el Fusible Seccionador Cut _Out clase 25 kV. Se aplicara un mastic termocontraible sobre las partes metálicas entre el Cut _Out y el aislador y entre el aislador y la abrazadera que va a la cruceta, finalmente se aplicara el compuesto anticorrosivo a los pernos y tuercas.

5.2 *Performance de Materiales en zona de alta contaminación*

5.2.1 *Evaluación de aisladores híbridos*

El sistema de monitoreo de corrientes de fuga en los aisladores implementado en las instalaciones aéreas piloto permitirá hacer un análisis del desempeño de los aisladores tradicionales de porcelana para sistemas de distribución aérea de 10 kV versus el aislador híbrido.

El aislador híbrido combina las ventajas de resistencia mecánica de la porcelana y la elevada performance ante contaminación.

Para zonas de corrosión extremadamente severa se deben utilizar cable autoportado, ya que en una oportunidad se instalo aisladores híbridos en la zona de la Bajada MARBELLA el cual estaba a una distancia de 400 metros del mar, al cabo de 8 meses cuando se realizo el mantenimiento preventivo se encontró descargas parciales en la manta del revestimiento polimérico.

Al cuantificar las corrientes de fuga se pretende demostrar que en ambientes de contaminación se justifica utilizar los aisladores híbridos.

Junto con las mediciones de corriente de fuga se espera poder tener las apreciaciones según el tipo de aislador.

- Pérdidas por corriente de fuga (kwh) y su valorización anual.
- Necesidad de mantenimiento preventivo (lavado de aisladores)
- Frecuencia con que debería realizarse la limpieza de aisladores.

En el año de 1997 se realizo las mediciones de corriente de fuga pico (mA) en una subestación aérea en un periodo de 8 meses

Corriente Fuga Pico (mA)	Aislador Porcelana	4,5 mA
-----------------------------------	---------------------------	---------------

Corriente Fuga Pico (mA)	Aislador Híbrido	0,1 mA
-----------------------------------	-------------------------	---------------

Por lo tanto el aislador mas adecuado es el **HIBRIDO**

5.2.2 *Evaluación de extensor de fuga*

Estos extensores se han instalado en los bushing de los transformadores aéreos con la finalidad de:

- Evitar que las descargas parciales por llovizna y humedad en los aisladores de porcelana del transformador distribución aérea hagan contacto con tierra, el cual ocasionaría una falla a tierra ocasionando la salida total de uno o más alimentadores.
- Evitar que las descargas parciales de los aisladores de porcelana del transformador distribución aérea hagan contacto entre ambos aisladores ocasionando un cortocircuito, con lo cual aperturarán los fusibles de expulsión.

Para los transformadores aéreos el diámetro del extensor de fuga seleccionado deberá ser de 80-100 mm.

5.2.3 *Evaluación de aislador extensor de fuga*

Estos extensores se han instalado en el Seccionador Cut Out logrando de esta manera incrementar la línea de fuga a 700 mm.

Por experiencia en campo se ha observado lo siguiente:

- Cuando se presenta una interrupción imprevista por falla a tierra en un alimentador y esta genera sobretensiones en la barra de 10 kV afectando a otros alimentadores, se ha observado que el Seccionador Cut_Out (sin Aislador Extensor Fuga) el cual tiene impregnado la brisa del mar y polución acompañado de llovizna no soporta la sobretensión ocasionando descargas parciales en un caso y en otros descarga total, ocasionando interrupciones imprevistas a corto y largo plazo.
- Si al Seccionador Cut_Out se le instala Aislador Extensor Fuga en condiciones de sobretensiones por falla a tierra no seria afectado dicho Seccionador por descarga parcial o total, logrando de esta manera evitar interrupción imprevista.

5.3 *Mantenimiento Preventivo y correctivo*

Las condiciones naturales que se tiene en una zona determinada es el primer elemento que determina la severidad de la contaminación, por lo cual la experiencia en campo nos permite tener criterios de montaje y mantenimiento de los aisladores y Cut_Out, los cuales son los más vulnerables a las condiciones climáticas del Callao.

VIENTOS. Cuando el sentido de los vientos predominantes es de la fuente emisora de contaminación hacia la instalación eléctrica, se alcanzan altos niveles de contaminación. Por el contrario si el sentido de los vientos es de la instalación eléctrica hacia la fuente contaminante, los niveles de contaminación son bajos.

LLUVIA. El efecto del lavado por lluvia natural, del contaminante que se deposita en los aislamientos es función del periodo de exposición, el tipo de contaminante y la superficie del aislador.

En Lima la lluvia son gotas de agua por lo no tiene mucho efecto en el lavado del contaminante de la superficie superior y inferior (el contaminante se deposita en mayor proporción).

Los criterios de mantenimiento preventivo, correctivo fueron los siguientes entre los años de 1996 a 1998:

- El mantenimiento preventivo fue para realizar la limpieza de los bushing de los transformadores aéreos, Seccionador Cut Out y aislador de porcelana, desde los años de 1996 a 1998 el periodo de mantenimiento fue de 5 veces al año, ya que no se contaba con los materiales para zonas de alta contaminación severa.
- El mantenimiento correctivo consistía en cambiar los aisladores de porcelana descargados, así como los Seccionador Cut, los cuales en ese momento no tenían los aisladores extensores de línea de fuga, hasta hoy en día en zonas de alta contaminación marina se viene realizando el cambio de Seccionador Cut Out con aislador extensor de línea de fuga al cabo de 3 años de funcionamiento.

Los criterios de mantenimiento preventivo, correctivo fueron los siguientes entre los años de 1998 a 2002:

- Con el uso de materiales para zonas de alta contaminación, el mantenimiento preventivo se realiza para la limpieza de los bushing con extensor de fuga en los transformadores aéreos, Seccionador

Cut Out con Aislador extensor de fuga y aislador híbrido y polimérico, hoy en día el periodo de mantenimiento es de 2 veces al año.

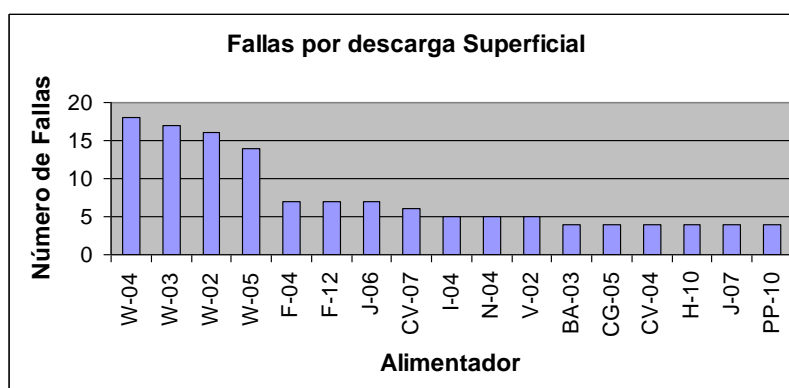
Los costos del mantenimiento correctivo en las redes de distribución también deben ser considerados más aún en nuestro caso puesto que la mayor parte de la subestación de Santa Marina es red aérea. Los costos de mantenimiento correctivo promedio se detallan a continuación:

COSTOS DE MANTENIMIENTO CORRECTIVO		
Componente a reparar	Unidad	Costo Prom. (Mat + MO) S/.
Red Aérea (RA)	Cjto	368.5
Red Subterránea (RS)	Cjto	1238.4
Subestación convencional (SN)	Cjto	5025
Subestación Aérea (SA)	Cjto	249.8
Subestación Compacta (SC)	Cjto	249
COSTOS POR ATENCION DE EMERGENCIA		
Descripción	Unidad	Costo S/.
Disponibilidad Cuadrilla Operación	Hora / cuadrilla	36.5
Disponibilidad Cuadrilla Localización	Hora / cuadrilla	59

5.4 Interrupciones relevantes en los alimentadores críticos

Interrupciones por descargas superficiales

Aparte de Santa Marina y aplicando los mismos criterios en otros alimentadores se presenta el cuadro de fallas por descarga superficial.



Alimentador F-04 y F-12 (Santa Marina)

Los principales problemas son los siguientes:

- ✓ Zona de alta polución, circuitos con aisladores de porcelana que requieren dos frecuencias por año.
- ✓ Subestaciones aéreas que no tienen campanas extensoras de línea de fuga, así como poste de seccionamiento con Seccionadores Cut-Out que no tiene aisladores extensores.

Las soluciones planteadas son las siguientes:

- ✓ Cambio de aisladores de porcelana por poliméricos
- ✓ Instalación de aisladores extensores en Seccionador Cut-Out
- ✓ Se ha realizado el mantenimiento preventivo en el primer semestre en estos alimentadores.

5.5 *Calculo de falla monofásica a tierra*

Los cálculos de las corrientes de Falla Monofásica a Tierra son para los 16 alimentadores de la SET SANTA MARINA

La longitud de redes aéreas y subterráneas son las siguientes:

Alimentador	Longitud Red Subterranea (Km)	Longitud Red Aerea (Km)	Longitud Total (Km)
F 01	11.089	2.848	13.937
F 03	4.212	2.805	7.017
F 04	8.584	3.225	11.809
F 05	1.76	2.505	4.265
F 06	1.6	0	1.6
F 07	7.091	2.277	9.368
F 08	4.474	0	4.474
F 09	4.6	2.716	7.316
F 11	4.016	2.497	6.513
F 12	1.282	4.382	5.664
F 14	10.891	1.632	12.523
F 16	2.59	3.275	5.865
F 17	6.423	2.83	9.253
F 18	7.716	3.799	11.515
F 19	5.791	4.594	10.385
F 18	3.588	0.022	3.61
Total	85.707	39.407	125.114

Para calcular las corrientes de falla a tierra en cada alimentador primero se calcula la capacitancia Homopolar de los alimentadores no fallados, con esto se calcula la reactancia Homopolar.

La capacitancia homopolar de cada alimentador considerando el tipo de cable (aluminio o cobre) es el mostrado en la siguiente tabla:

Alimentador	Capacitancia
F 01	2,2401
F 03	0,9661
F 04	2,2767
F 05	0,3915
F 06	0,3679
F 07	1,5504
F 08	1,0567
F 09	1,1283
F 11	0,9851
F 12	0,6284
F 14	2,1583
F 16	0,5207
F 17	1,6029
F 18	2,1149
F 19	1,4091
F 21	0,6572

Para determinar la relación de transformación del Transformador toroidal solo basta observar la corriente homopolar $3I_o$ con una resistencia de falla de 0 ohmios y nos indica que la máxima corriente es de 128 amperios cuando la falla sea en el alimentador F 06, el que tiene menor Capacitancia Homopolar.

Tenemos que considerar la resistividad del terreno para hacer los cálculos de la probable corriente homopolar, para lo que presentamos una tabla típica de la resistencia de falla de suelos típicos.

TIPO DE SUELO EN PUNTO DE FALLA	INTERVALO DE TIEMPO (ms)	RESISTENCIA DE FALLA (ohmios)
Jardín con cesped	0 .. 280 290 550 .. 850	91.6 137 40.5
Tierra seca y pocas piedras	85 .. 125 125 .. 440	233 58.8
Tierra seca de cultivo	0 .. 220 220 .. 700	62.9 42
Tierra humeda con hierba	0 .. 50 50 .. 260 260 .. 700	17.6 13.3 9.6
Tierra de cultivo	0 .. 110 200 .. 400	43.3 15
Pedregoso con residuos de construcción	0 .. 300 310 550 .. 1050	253 289 98.6
Terreno arenoso con piedras	0 .. 150 150 .. 215 215 .. 285 285 .. 415 415 .. 915	7619 1515 920 553 395
Asfalto	0 .. 105 105 .. 400	141 203
Vereda humeda	0 .. 450 450 .. 800	38.1 31.2
Arena seca	0 .. 300	659
Acequia con poca agua	0 .. 65 65 .. 175 175 .. 895	47 27 23

5.6 *Ajuste de relé de protección*

El rango de resistencias de falla a tierra en los sistemas de distribución es muy amplio, de manera que se puede efectuar la calibración para una resistencia de falla a tierra de 200 ohmios y cuando ocurra una falla de 500 ohmios, esta protección no operaría.

Debido a esto, muchas veces se opta por calibrar a valores de resistencia mas altas, por ejemplo de 800 ohmios, sin embargo, en estas circunstancias ante cualquier descarga de alta resistencia en los aisladores estaría operando la protección y originando una interrupción innecesaria del suministro. Esto ocurre generalmente cuando en un alimentador existe una falla con $R=0$, originando que las otras fases a tierra

tengan una tensión cercana a los 10 kV, es decir bruscamente se incrementa la tensión fase neutro de 5773 voltios a 10000 voltios, lo que origina descargas de alta resistencia en muchos aisladores de diferentes alimentadores originando una apertura simultánea de varios alimentadores lo que perjudica la calidad del servicio eléctrico.

Estadísticamente se han observado que la mayoría de las interrupciones, del orden del 60%, son debido a fugas en aisladores por lo que una opción a la solución de este inconveniente es efectuar el recierre, con lo cual de alguna manera se soluciona el problema. Sin embargo, en el caso que exista una falla con resistencia casi cero, el recierre no es satisfactorio, ya que nuevamente se produce el fenómeno descrito en el párrafo anterior.

Además, el peligro de efectuar el recierre es que si el conductor se ha caído al suelo, con el evidente riesgo de un accidente eléctrico, al efectuar el recierre se aumentaría el riesgo de que ocurra un accidente o pérdida de vida humana.

Los criterios de calibración de la protección direccional de sobrecorriente homopolar, simplemente se procede a aplicar las ecuaciones vertidas, por ejemplo, si tenemos un sistema de distribución de 10 kV cuya reactancia homopolar total es de 400 ohm y se desea calcular los ajustes para una falla a tierra de 500 ohm, siendo la relación de transformación de 200/1 A, se obtiene lo siguiente:

$$\begin{aligned} X_{CT0} &= 400 \text{ ohm} \\ R_{\text{falla}} &= 500 \text{ ohm} \\ V_n &= 10 \text{ kV} \end{aligned}$$

$$I_o = \frac{10/\sqrt{3}}{\sqrt{(3 \times 500)^2 + 400^2}} = 3.72 \text{ A en el primario}$$

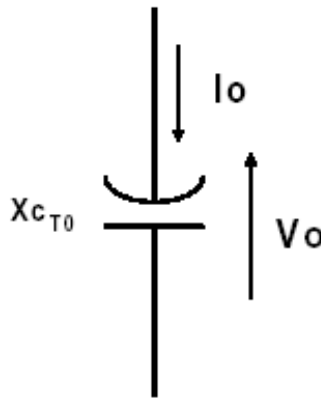
Luego el ajuste del rele sería:

$$I_{\text{rele}} = 3 I_o / 200 = 56 \text{ ma}$$

$$\mathbf{I_{\text{relé}} = 56 \text{ ma}}$$

5.6.1 *Angulo Característico del Rele*

Las tensiones y corrientes homopolares en los sistemas aislados, forman siempre un ángulo característico de 90 grados debido a que la reactancia de secuencia cero es de naturaleza capacitiva, tal como se indicara en los gráficos anteriores, lo que se muestra a continuación.



El ángulo entre V_o e I_o es siempre 90°

Angulo característico del rele = 90°

5.6.2 *Función de Protección contra fallas a tierra*

La forma de mejorar el sistema de protección contra fallas a tierra basado en reles direccionales de sobrecorriente homopolar, es tener dos funciones de protección, una de ellas regulada con alta sensibilidad a las fallas a tierra, por ejemplo 800 ohmios, pero que esta función sea confirmada por dos funciones adicionales, el decremento de la secuencia positiva y el incremento de la secuencia negativa, condiciones que generalmente acontecen al romperse un conductor y caer al suelo.

Esta función no tendría la necesidad de hacer recierre, sin embargo esto debe dejarse a elección del usuario.

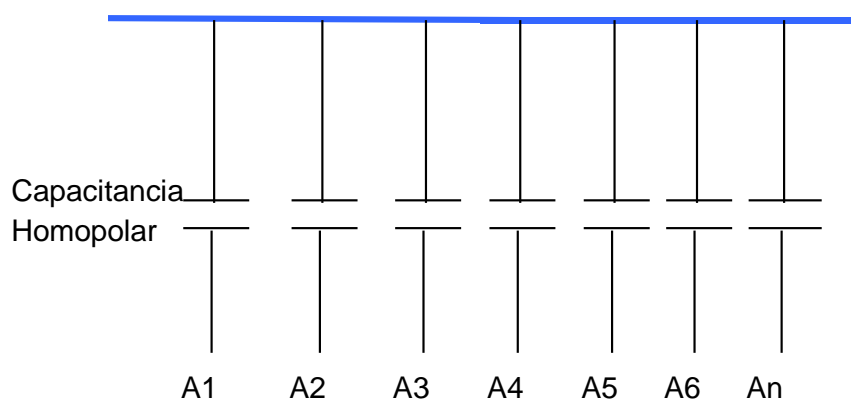
La otra función, con un tiempo de operación mayor que la anterior, sería simplemente una función direccional de sobrecorriente homopolar, pero regulada a menos sensibilidad, por ejemplo 200 ó 100 ohmios y que no tendría confirmación de la secuencia positiva y de la secuencia negativa, esta función originaría un recierre, siendo la opción del recierre a elección del usuario.

En el siguiente ejemplo explicativo se detallará como se debe proceder para ajustar correctamente el relé de protección de falla a tierra a fin de no tener actuaciones incorrectas de la protección debidas a la corriente homopolar de retorno que circula a través de los alimentadores no involucrados en la falla.

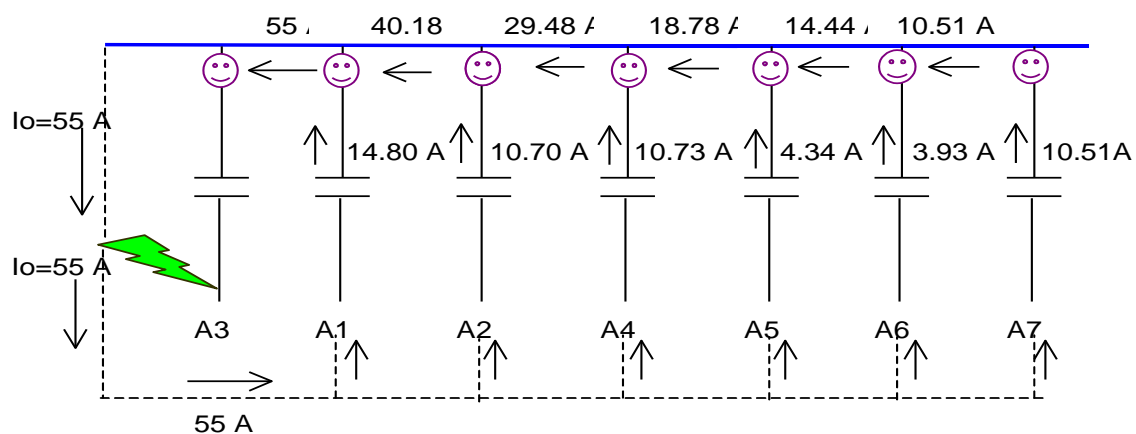
Cada alimentador se representara por su capacitancia homopolar.

Lamentablemente la implementación de la direccionalidad en subestaciones en las que se presentan reles con función de falla a tierra es muy costosa por el hecho de que tienen que ser instalados transformadores de tensión los cuales tienen que polarizar los reles a fin de poder activarse la función de direccionalidad lo

que en la actualidad aún se presentan muchas subestaciones en Santa Marina que no presentan ajuste de direccionalidad.



En los alimentadores A1, A2, A3, A4, A5, A6 y A7 los Relés de falla a tierra serán direccionales, con la finalidad de que por una falla a tierra en un alimentador A3, esta corriente homopolar de falla retornara para cerrar el circuito por los alimentadores no fallados A1, A2, A4, A5, A6 y A7 y no ocasione disparos incorrectos a los relés.



Por lo tanto el ajuste del Relé Falla a Tierra del alimentador será:

Ajustes	Corriente Homopolar	Tiempo
$I_{0>}$	9 A	3 s
$I_{0>>}$	40 A	1,5 s
$I_{0>>>}$	80 A	1 s

En cambio en subestaciones convencionales de distribución en donde se instalaran los Relés de falla a tierra serán direccionales para los enlaces troncales, esto porque la corriente homopolar de retorno por falla en otro alimentador no ocasiona disparo incorrecto al relé del alimentador sano.

En los enlaces laterales y clientes serán no direccionales, ya que la corriente de retorno es muy pequeña que no originaria la apertura del Relé.

Los ajustes del Relé de falla a tierra en las subestaciones convencionales serán de la siguiente manera:

Ajustes	Corriente Homopolar	Tiempo
$I_{0>}$	5 A	2 s
$I_{0>>}$	40 A	0,5 s

**CORRIENTE HOMOPOLAR POR FALLA A TIERRA EN LOS
ALIMENTADORES DE LA SET SANTA MARINA PARA VALORES DE
RESISTENCIA DE FALLA DE 0 Y 600 OHMIOS**

Nro	SET	Alimentador	Corriente Homopolar	
			Resistencia Falla 0 Ohmios	Resistencia Falla 600 Ohmios
1	SANTA MARINA	F-01	116.32	9.59
2	SANTA MARINA	F-03	124.64	9.59
3	SANTA MARINA	F-04	116.08	9.60
4	SANTA MARINA	F-05	128.39	9.60
5	SANTA MARINA	F-06	128.55	9.60
6	SANTA MARINA	F-07	120.82	9.59
7	SANTA MARINA	F-08	124.05	9.59
8	SANTA MARINA	F-09	123.58	9.59
9	SANTA MARINA	F-11	124.52	9.59
10	SANTA MARINA	F-12	126.85	9.59
11	SANTA MARINA	F-14	116.86	9.59
12	SANTA MARINA	F-16	127.55	9.6
13	SANTA MARINA	F-17	120.48	9.59
14	SANTA MARINA	F-18	117.14	9.59
15	SANTA MARINA	F-19	121.75	9.59
16	SANTA MARINA	F-21	126.66	9.59

5.7 *Análisis de falla monofásica y doble falla a tierra*

En esta temporada del año las redes aéreas de distribución del SET SANTA MARINA estudiada están continuamente expuestas a densas neblinas e intensas lloviznas, este fenómeno adicionado al efecto de adherencia del polvo sobre los aisladores de porcelana de los transformadores y seccionadores cut out, constituye la principal causa de las interrupciones imprevistas.

En los sistemas de distribución frecuentemente al existir una descarga a tierra como resultado de un conductor caído o de una descarga en algún aislador del sistema, produce el desplazamiento del neutro originando que las tensiones fase tierra de las fases no falladas se incrementen en todo el sistema de distribución dando origen a nuevas descargas en algún punto del sistema de distribución

Por ejemplo con la falla a tierra en un alimentador el Seccionador Cut Out ubicado en otro alimentador de la misma barra esta sometido a una tensión fase tierra de 10 kV, luego al producirse lluvia, cae el agua por la parte superior del Cut Out en el orificio el cual esta encintando con lo cual forma un embudo lo que trae consigo que el agua se quede alojado luego al no haber mas agua en el embudo este cae en el cuerpo de la porcelana con la cual se presentan las descargas superficiales.



Esto ocurre generalmente en alimentadores que se encuentran con un grado de contaminación por sal marina, industrial y polvo, en otras palabras alimentadores sin mantenimiento, resultando de este fenómeno que apertura más de un alimentador a la vez. Se han dado casos en que han aperturado 5 alimentadores simultáneamente a este tipo de falla se conoce como Doble Falla Tierra.

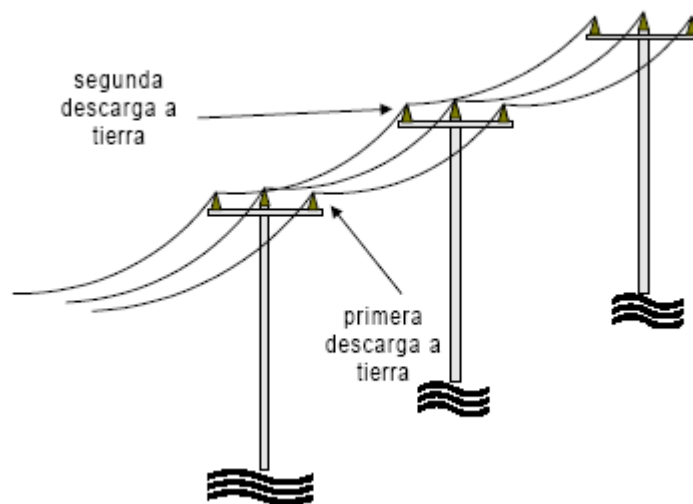
5.7.1 *Problemática de implementar la protección de falla a tierra*

La implementación de la protección contra las fallas a tierra se efectúa para proteger a las personas de los choques eléctricos al romperse un conductor de una línea de distribución más no para proteger al sistema eléctrico.

Como resultado de la implementación de esta protección en los sistemas de distribución, al producirse una falla a tierra ya sea un conductor caído o una descarga en los aisladores, la protección detectaría estas fallas y abriría el interruptor del alimentador correspondiente.

5.7.2 *Fallas evolutivas bajan la calidad del servicio*

En los sistemas de distribución frecuentemente al existir una descarga a tierra como resultado de un conductor caído o de una descarga en algún aislador del sistema, produce el desplazamiento del neutro originando que las tensiones fase a tierra de las fases no falladas se incrementen en todo el sistema de distribución, esto ocurre generalmente en alimentadores que se encuentran con un grado de polución alto, en otras palabras alimentadores sin mantenimiento, resultando de este fenómeno que apertura más de un alimentador a la vez. Se han dado casos en que han aperturado 5 alimentadores simultáneamente.

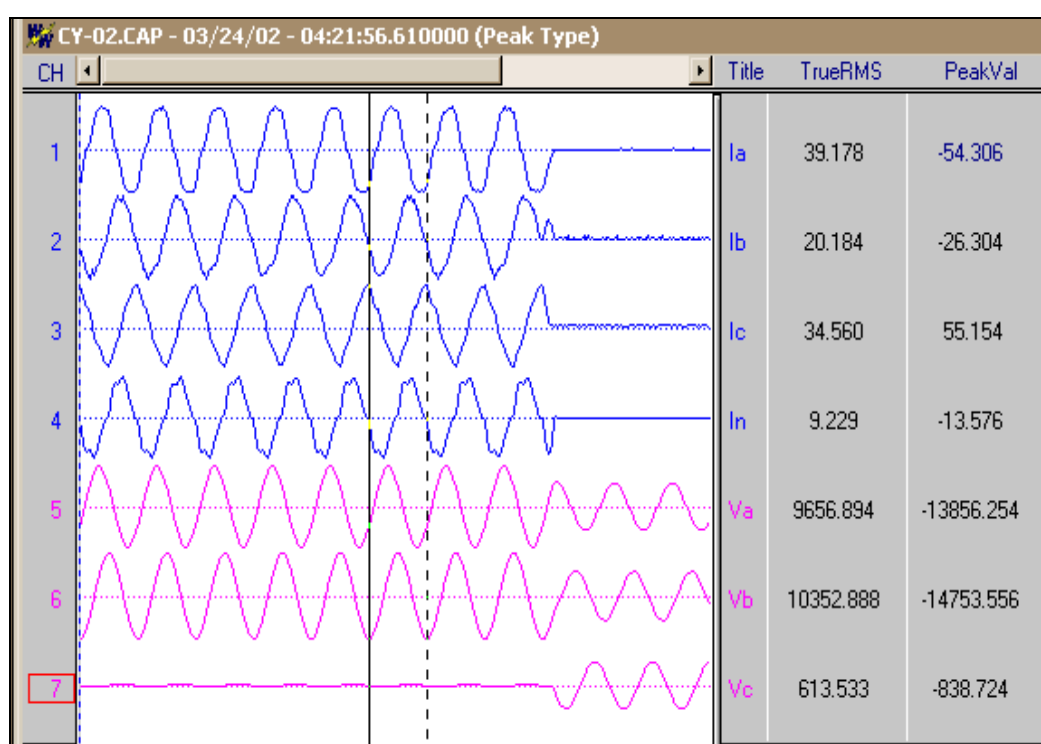


El fenómeno descrito anteriormente merma notablemente la calidad de servicio, por lo que en la aplicación de este tipo de protección debe existir un ajuste adecuado de la protección de manera que este opere ante la mayoría de fallas a tierra por desprendimiento del conductor y no ocurran muchas aperturas por descargas en aisladores.

5.8 Oscilografía de una falla monofásica a tierra

A continuación se muestra la oscilografía de una falla monofásica a tierra que se ha registrado en el sistema de distribución de la zona de Lima. Observamos que existía inicialmente una falla a tierra con una corriente homopolar de 9.229 amperios en la Fase C con menor tensión, cercano a los 613 voltios mientras que en las otras fases la tensión es de 9656 y 10 352 voltios, esto debido al desplazamiento del neutro, recordemos que en condiciones normales de operación cada fase a tierra debería estar a 5773 voltios.

Oscilografía Rele



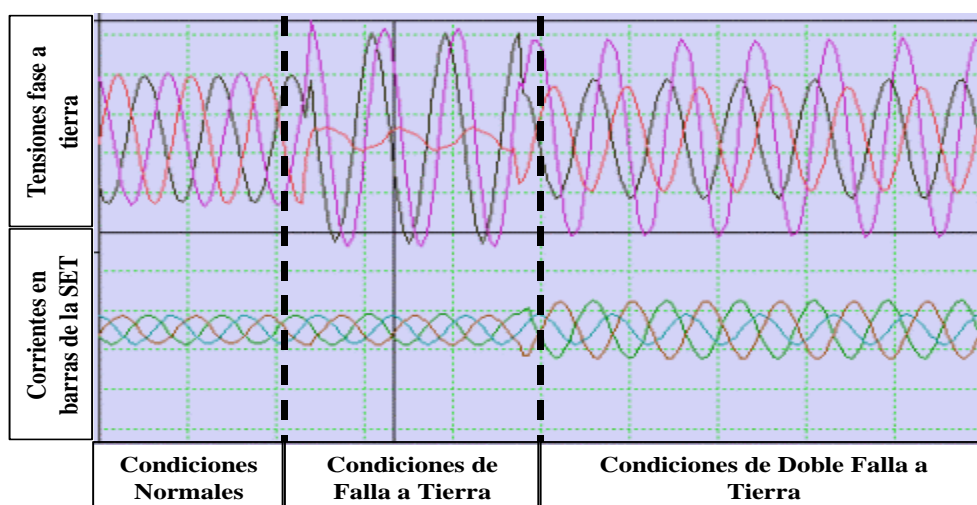
5.9 Doble Falla a Tierra

La corriente de doble falla a tierra se presenta cuando se producen dos fallas al mismo tiempo en dos alimentadores distintos, pero que pertenezcan a una misma barra del SET.

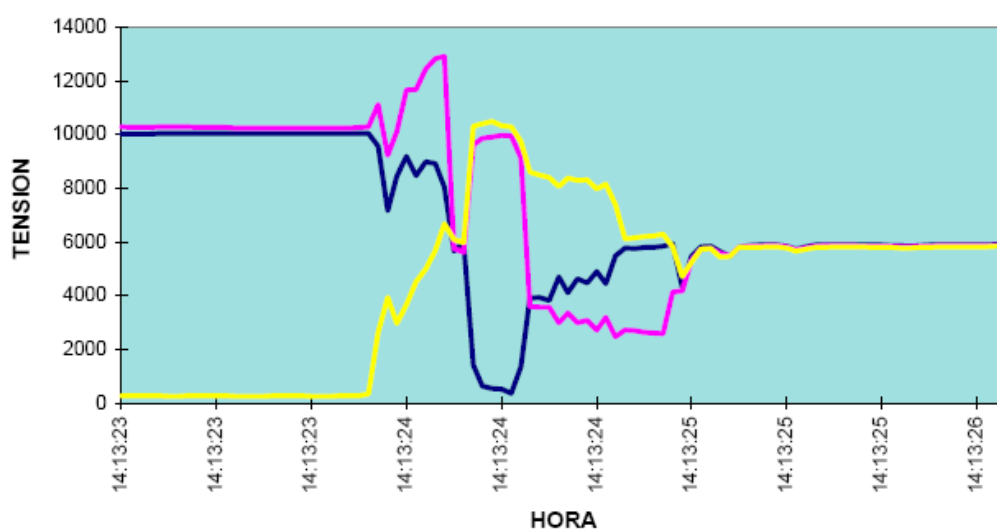
La corriente doble falla a tierra se origina cuando se presenta primero una falla Monofásica a tierra por cualquier causa, con lo cual las fases sanas tiene una tensión fase a tierra de 10 kV el cual es aplicado a los Aisladores, Seccionador Cut Out los cuales inicialmente se encuentran

impregnados de polvo, sal marina y con la lluvia se generan descargas múltiples en varios alimentadores por fallas de cortocircuito y falla a tierra.

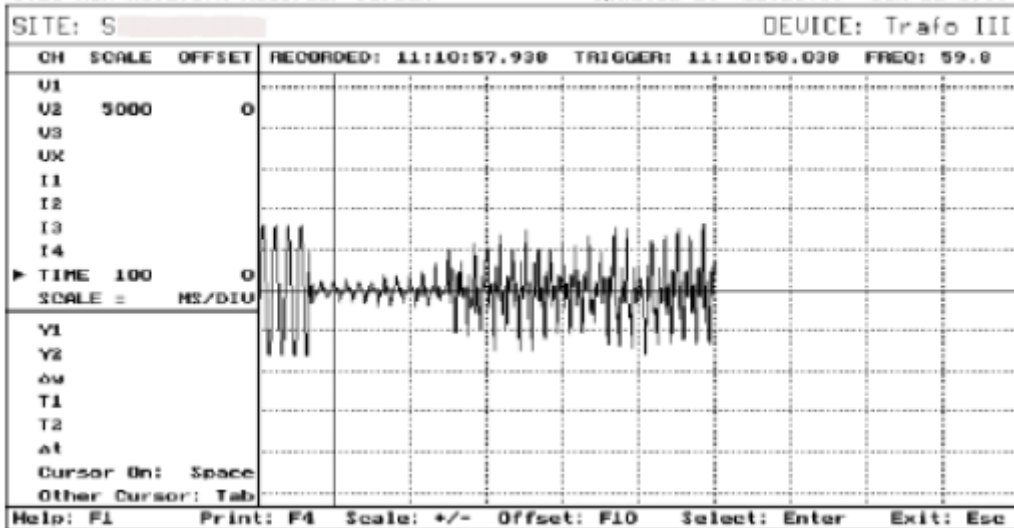
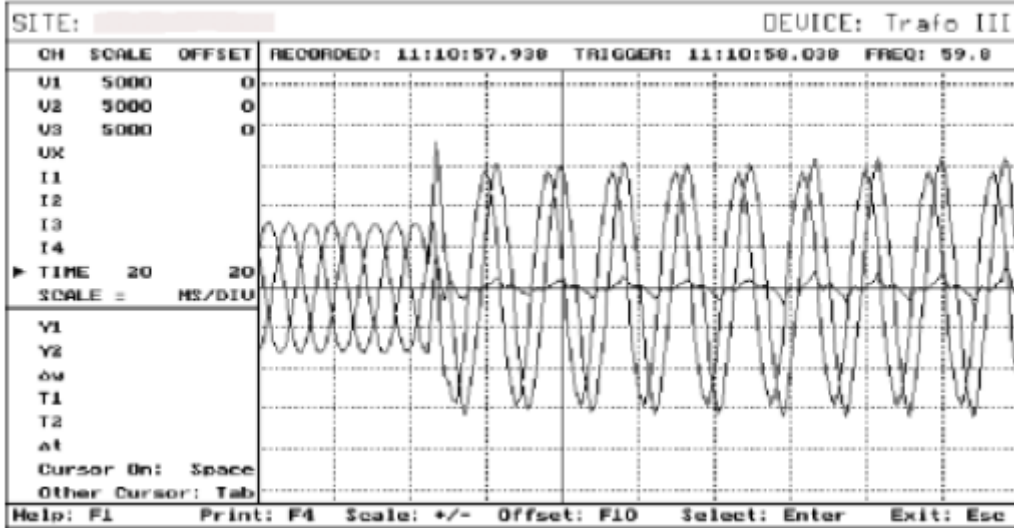
El valor de la corriente homopolar llega a valores de 400, 600 y 800 amperios, los cuales pueden ser detectados por los Relés de Sobrecorriente Fase y Sobrecorriente Homopolar.



FALLA EVOLUTIVA A TIERRA

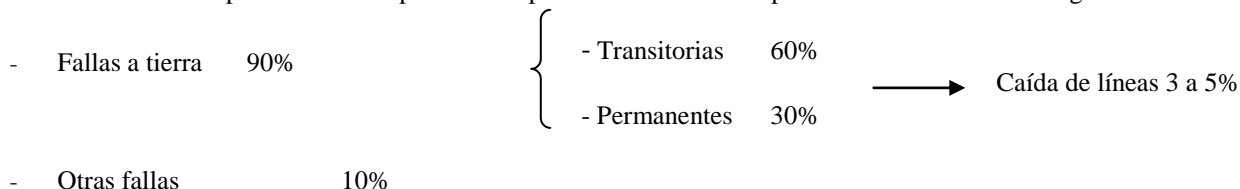


Si analizamos en detalle las formas de tensiones y corrientes de una falla a tierra notamos que tiene un alto componente de armónicos de tercer orden, por lo tanto es imprescindible que los relés direccionales de sobrecorriente homopolar tengan filtros de tercera armónica.



5.10 Estadísticas de interrupciones imprevistas MT

La distribución porcentual del tipo de fallas para la zona de Lima aproximadamente es como sigue:



Esto significa que solo un 5% de las fallas en distribución se deben a conductores caídos, razón por la que se instala la protección contra fallas a tierra, sin embargo el sistema de distribución detectaría y despejaría un 85% de las fallas que se deben en un gran porcentaje a descargas transitorias y permanentes en aisladores; dicho de otra forma de cada 100 fallas la protección debería despejar 10 fallas de fase y 5 fallas por conductores caídos, en total 15 fallas, 15 interrupciones. Sin embargo la protección contra fallas a tierra despejaría adicionalmente 85 fallas, 60 transitorias y 25 permanentes; es decir 85 interrupciones adicionales, lo que evidentemente afectaría la calidad del servicio.

La estadística de fallas por interrupciones imprevistas de 10 kV que se tiene, es desde el año 1995 a 2002, las cuales tuvieron la salida total del alimentador por diversas causas como: Descarga superficial en aisladores, Seccionador Cut_Out, cable defectuoso, choque vehículo, mal montaje, instalaciones internas de los clientes, cable dañado por terceros, etc.

5.11 Estadísticas de interrupciones imprevistas MT

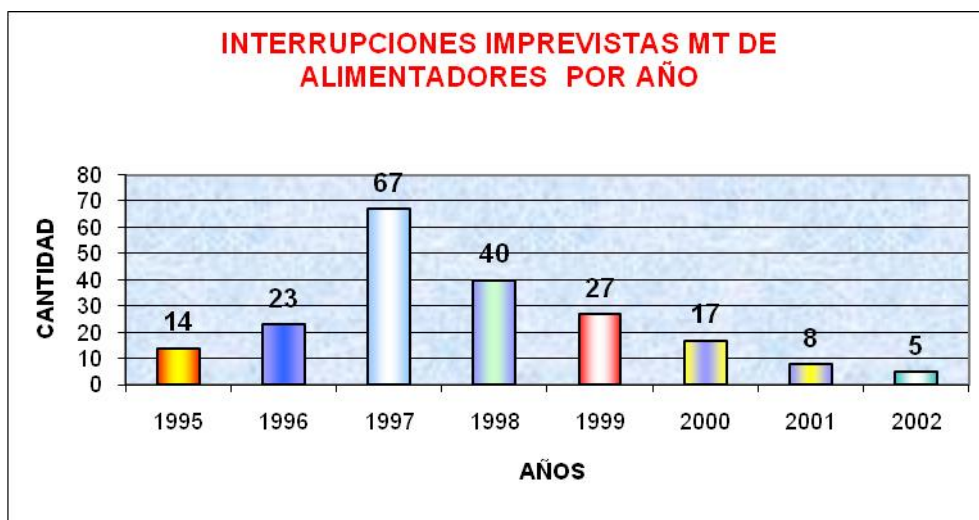
AÑO 1995- La cantidad de redes aéreas era de 20 Km. no se contaba con materiales para zona de extremada y severa corrosión severa.

AÑO 1996- A fines de diciembre se analizaron las interrupciones imprevistas MT a fin de realizar las acciones correctivas. El estudio se concluye en demarcar la zona de extremada corrosión a 400 metros del mar y la zona de severa corrosión a 1 Km. del mar.

AÑO 1997- Se realiza la ubicación de las redes de acuerdo a zona de extremada y severa corrosión, así como la normalización de los materiales los cuales son: Cable Autosoportado para zona de extremada corrosión y Aisladores Híbrido, Polimérico, Extensor de Fuga para los Bushing del transformador aéreo, Aislador extensor del Seccionador Cut_Out para zona severa corrosión.

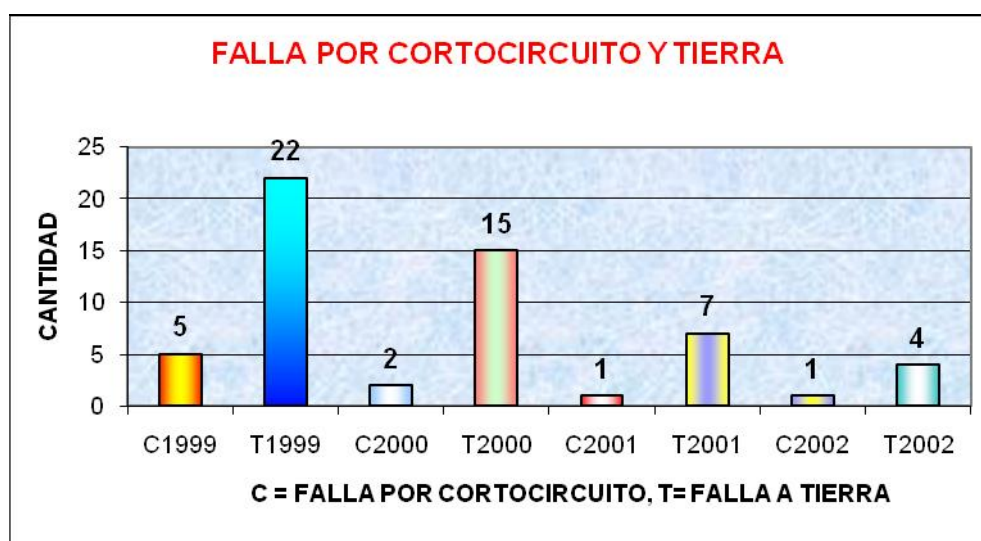
AÑO 1998- Se realiza la ejecución del proyecto Normalización de los materiales para las zonas extremada y severa corrosión.

Desde el año 1999 al 2008 las interrupciones imprevistas por falla a tierra y cortocircuito han disminuido notablemente, esto se debe a la implementación en las subestaciones convencionales de los Relés Multifunción de Sobrecorriente de fase y Sobrecorriente Homopolar.



NUMERO DE INTERRUPCIONES IMPREVISTAS MT POR CORTOCIRCUITO Y FALLA A TIERRA CON SALIDA TOTAL DE ALIMENTADORES DESDE 1999 AL 2002

La cantidad de interrupciones imprevistas 10 kV por falla a tierra es mucho mayor a la cantidad de fallas por cortocircuito, esto se debe a que en las subestaciones de distribución en la mayoría de los casos solos se cuenta con relés primarios que detectan fallas por cortocircuito.

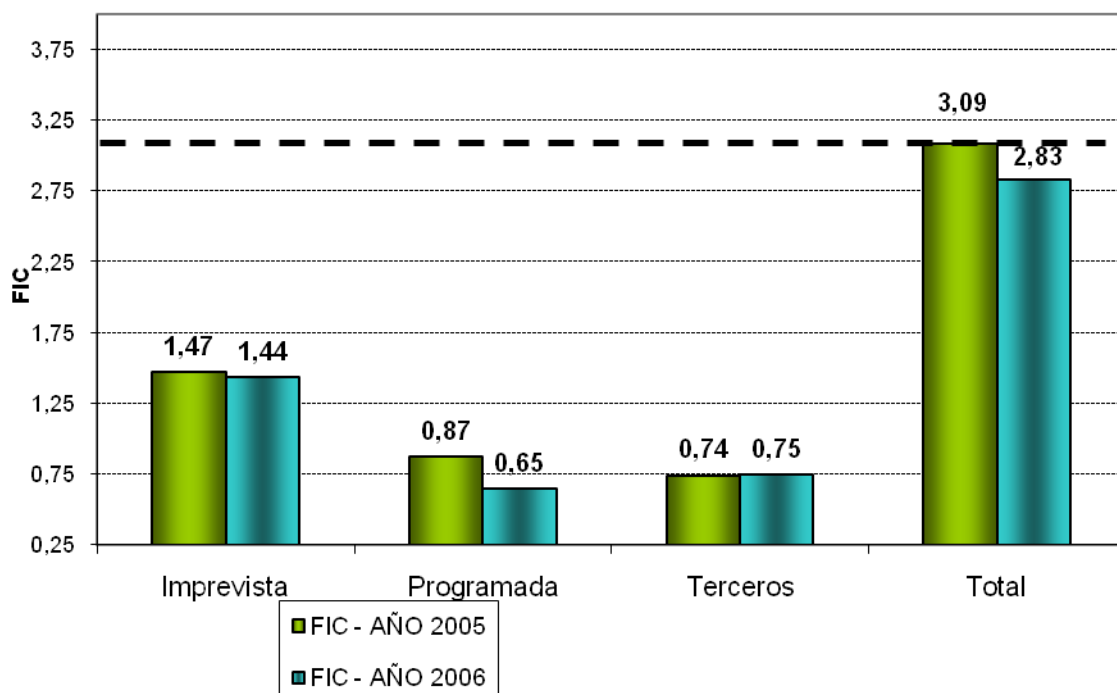


5.12 *Mejoramiento de indicadores de Calidad FIC y TIC*

DISTRIBUCION

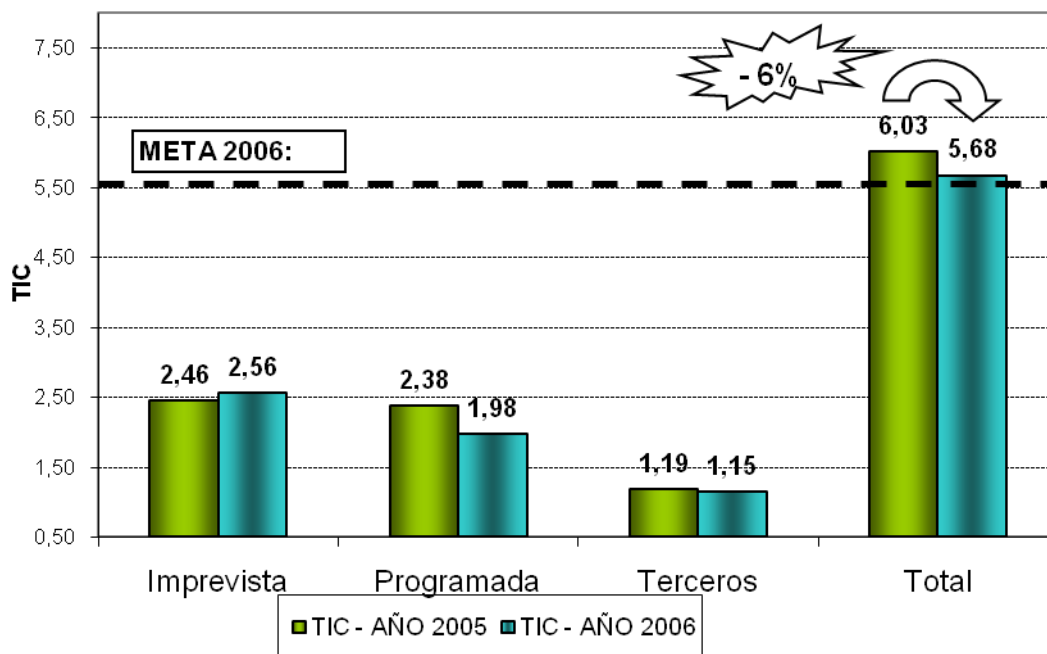
FRECUENCIA					META	% META
Cantidad de clientes	Imprevista	Programada	Terceros	Total		
FIC - AÑO 2005	1,47	0,87	0,74	3,09	0,58	534%
FIC - AÑO 2006	1,44	0,65	0,75	2,83	3,08	92%
% VARIACION	-2%	-26%	1%	-8%		

**FRECUENCIAS DE INTERRUPCION POR CLIENTE (FIC) -
DISTRIBUCION
ACUMULADOS AÑO 2005 Y 2006**



TIEMPO DE INTERRUPCION						
Cantidad de clientes	Imprevista	Programada	Terceros	Total	META	% META
TIC - AÑO 2005	2,46	2,38	1,19	6,03	0,58	1043%
TIC - AÑO 2006	2,56	1,98	1,15	5,68	5,56	102%
VARIACION	4%	-17%	-4%	-6%		

**TIEMPOS DE INTERRUPCIONES POR CLIENTE (TIC) -
DISTRIBUCION
AÑOS 2005 Y 2006**



5.13 Implementación de la protección de falla a tierra

El rango de resistencia de fallas a tierra en los sistemas de distribución es muy amplio, de manera que se puede efectuar la calibración para una resistencia de falla a tierra de 200 ohmios y cuando ocurra una falla de 500 ohmios, esta protección no operaría.

Debido a esto, muchas veces se opta por calibrar a valores de resistencias más altas, por ejemplo 800 ohmios, sin embargo, en estas circunstancias ante cualquier descarga de alta resistencia en los aisladores estaría operando la protección y originando una interrupción innecesaria del suministro. Esto ocurre generalmente cuando en un alimentador existe una falla con $R=0$, originando que las otras fases a tierra tengan una tensión cercana a los 10 kV, es decir bruscamente se incrementa la tensión fase neutro de 5773 voltios a 10000 voltios, lo que origina descargas de alta resistencia en muchos aisladores de diferentes alimentadores originando una apertura simultánea de varios alimentadores lo que perjudica la calidad del servicio eléctrico.

La manera de mejorar la protección contra fallas a tierra sería implementar dos funciones de protección, una para fallas de alta impedancia, pero que esta función sea confirmada por dos funciones adicionales, el decremento de la secuencia positiva y el incremento de la secuencia negativa, condiciones que generalmente acontecen al romperse un conductor y caer al suelo, esta función no tendría la necesidad de tener recierre, sin embargo esto debe dejarse a elección del usuario.

La otra función, con un tiempo de operación mayor que la anterior, sería simplemente una función direccional de sobrecorriente homopolar, pero regulada a menos sensibilidad, por ejemplo 200 ó 100 ohmios y que no tendría confirmación de la secuencia positiva y de la secuencia negativa, esta función originaría un recierre, siendo la opción del recierre a elección del usuario.

VI. RESULTADOS

- 1) En un sistema con Neutro Puesto a Tierra (NPT) no deben usarse relés direccionales, lo adecuado es usar relés de sobrecorriente no direccional.
- 2) En sistemas con NPT no deben usarse cargas conectadas al neutro ya que esto impide la discriminación de las fallas a tierra por los relés de sobrecorriente homopolar.
- 3) En sistemas con Neutro Aislado, la protección direccional de sobrecorriente homopolar solo es posible con más de un alimentador, en sistemas con NPT es posible con un alimentador.
- 4) La protección en sistemas con Neutro Aislado con un solo alimentador es posible con relés de sobretensión homopolar.
- 5) Es necesario que se respeten las áreas debajo de las líneas aéreas ya que si el conductor eléctrico le cae a una persona, esta sufrirá el efecto eléctrico y mecánico y luego funcionaría la protección.
- 6) Es importante determinar y solucionar el problema de las caídas de conductores, las líneas no se deben caer por temblores, cortocircuitos, etc. por lo tanto es necesario definir calibres mínimos.
- 7) Hay que darle importancia a la calidad de la ferretería, al montaje de la línea y a la recepción de las obras.
- 8) Con la instalación de la protección de fallas a tierra, es necesario aumentar el periodo del mantenimiento para mejorar la calidad del servicio.
- 9) Los sistemas aislados tienen una ventaja sobre los sistemas puestos a tierra desde el punto de vista de la tensión que se vería sometida una persona ante la caída de un conductor, en los sistemas aislados la tensión fase tierra del conductor caído es baja, mientras que en los sistemas puestos a tierra esta tensión prácticamente no varía con la falla siendo del orden de 5773 voltios para una red de 10 kV.
- 10) Es importante hacer notar que todas las protecciones existentes en el mundo para que puedan operar primero tiene que existir la falla y después el relé estaría en condiciones de detectar y despejar la falla. Esto significa que la protección de sobrecorriente homopolar para que funcione primero tiene que caer el conductor al suelo para generar la corriente homopolar, es decir, si la línea cae encima de personas o viviendas estas serán sometidas al efecto eléctrico y después operaría la protección. No existe protección alguna que detecte el conductor en el instante que se rompe, ya que en ese momento no existe la corriente homopolar, parámetro determinante que indica la falla a tierra.
- 11) La resistencia de contacto a tierra de un conductor caído puede tener un margen muy amplio, de cero ohmios hasta casi infinito, sin embargo toda protección tiene un rango de operación y fuera de esta la protección no actúa, en ese sentido es importante que las fallas a tierra tengan valores que sean capaces de ser detectados por los relés direccionales de sobrecorriente homopolar.

- 12) De acuerdo a lo mencionado en el párrafo anterior, el diseñador de las redes de distribución aéreas, debe tratar en lo posible de buscar un recorrido de forma tal que al caerse el conductor se asegure la baja resistencia de contacto a tierra para permitir la operación del relé direccional de sobrecorriente homopolar. Por lo tanto no es conveniente pasar una línea aérea encima de veredas y asfalto ya que se corre el riesgo de que la protección no actúe.
- 13) También hay que evitar instalar otros tipos de redes debajo de las líneas aéreas que impidan que el conductor llegue al suelo al romperse y no ser detectado por la protección. Adicionalmente se corre el riesgo que la tensión de 10 kV pase a la red instalada debajo de la línea con todos los problemas que puede ocasionar esta eventualidad a los usuarios de esas redes, por ejemplo una red telefónica.
- 14) Para la adquisición de relés direccionales de sobrecorriente homopolar es muy importante efectuar la consulta sobre el buen funcionamiento de marcas y tipos, a empresas que tienen instalados por muchos años este tipo de protección, como EDELNOR y LUZ DEL SUR, ya que se han dado casos en que los fabricantes aseguran la buena operación de sus relés y en la práctica no operan.
- 15) La protección direccional de sobrecorriente homopolar tiene una experiencia de casi 20 años en la zona de Lima, habiendo tenido buenos resultados.

VII. CONCLUSIONES

- 1) Con la instalación de los Relés de Falla a Tierra en las Subestaciones Convencionales, se han reducido las salidas totales de los alimentadores no involucrados en la falla, ya que la protección desconecta la parte fallada sin comprometer al alimentador.
- 2) Con el conocimiento teórico y práctico de la Falla Monofásica a Tierra y Doble Falla a Tierra, se han realizado los ajustes y coordinación de la protección.
- 3) Con el empleo de los materiales para zona de extremada y severa corrosión se han disminuido los índices de salida total de alimentadores por interrupciones imprevistas.
- 4) La forma de mejorar el sistema de protección contra fallas a tierra basado en relés direccionales de sobrecorriente homopolar, es tener dos funciones de protección, una de ellas regulada con alta sensibilidad a las fallas a tierra, por ejemplo 800 ohmios, pero que esta función sea confirmada por dos funciones adicionales, el decremento de la secuencia positiva y el incremento de la secuencia negativa, condiciones que generalmente acontecen al romperse un conductor y caer al suelo.
- 5) Los periodos de mantenimiento preventivo en las redes aéreas se han reducido a dos veces por año.

VIII. RECOMENDACIONES

- 1) El mantenimiento preventivo en las redes aéreas de distribución ya no solo consistiría en realizar la limpieza de los aisladores de porcelana (ya en pocos días nuevamente se encuentra adherencia del polvo), sino se sugiere es realizar el cambio de dichos aisladores de porcelana por aquellos del tipo híbrido y polimérico los cuales de acuerdo a estadísticas tienen un periodo de mantenimiento de 06 meses.

PLANEAMIENTO DEL MANTENIMIENTO PREVENTIVO ALIMENTADORES F-09

N°	Circuito	Tipo Red	Datos Relevantes Circuito	Condiciones Ambientales	Frecuencia 2007	Afecta Clientes	Clasificación
1	F-09 A SE 1196	Subterráneo				NO	
2	SE 1196 A SAP 2828	Mixto	Rele HB	Zona Mediana Contaminación Salina	1	SI	A
3	SE 1196 A SE 443	Subterráneo	Interruptor Autónomo + Rele Wipp 1	Zona Alta Contaminación Salina	1	SI	A
4	SE 443 A SE 105	Mixto	La red es con aisladores poliméricos y cable autoportado	Zona Mediana Contaminación Salina		SI	B
5	SE 443 A SAP 2829	Mixto	Seccionador Potencia Marca Schenneider	Zona Mediana Contaminación Salina	1	SI	A
6	SE 105 A SAP 20252	Mixto	Seccionador Potencia Marca Femec	Zona Mediana Contaminación Salina	1	SI	A
7	SE 105 A SE 293	Subterráneo	Solo se tiene equipo de maniobra			NO	
8	SE 293 A SE 96	Subterráneo	Reles HB no están coordinando en forma conveniente			NO	
9	SE 96 A SE 1492	Subterráneo	Subestación por antecedentes donde se ha tenido inundación por desborde del mar			NO	
10	SE 1492 A SE 101 T SE 103	Subterráneo	Subestación por antecedentes donde se ha tenido inundación por desborde del mar			NO	

- 2) Se recomienda la implementación de la protección contra fallas a tierra en las subestaciones convencionales de distribución para la coordinación con el Relé Multifunción del alimentador cuando se presenten fallas monofásicas y dobles fallas a tierra.
- 3) El número de recierre para fallas a tierra debe ser solo uno, la razón es que una falla continua a tierra con dos o más recierres en un circuito acompañado de densa neblina, llovizna y adherencia de polvo en los accesorios de la red aérea puede ser sujeto a posibles sobretensiones severas, los cuales pueden ser de muy alta magnitud, esto puede perforar el aislamiento y resultar en adicionales fallas a tierra los cuales se pueden traducir posteriormente en cortocircuitos, el origen de estas sobretensiones elevadas son causadas por repetitivas acumulaciones de carga capacitivas en el sistema.
- 4) Verificar que los clientes en media tensión no tengan conexión física del neutro del transformador al pozo de puesta a tierra en el lado de 10 kV, el cual puede originar corrientes homopolares de alta magnitud. Realizar el mantenimiento preventivo y correctivo a los pozos de tierra de MT a fin de garantizar la operatividad del Relé de Falla a Tierra.

IX. BIBLIOGRAFÍA

- Protección de Sistema Potencia Ing. Carlos Arroyo Arana
- Neutral Grounding In High Voltage R. Willheim M. Waters
- Power System Protection P. M. Anderson
- Trabajos Investigación Waldo Galvez
- Manuales de Instalación de Reles de Protección

LISTA DE TABLAS

Las siguientes tablas nos muestran una simulación por alimentador de la corriente y la tensión homopolar en relación a la resistencia de falla a tierra dependiendo del tipo de terreno en donde se produzca dicha falla.

ALIMENTADOR F 01

R falla (Ohm)	Io (A)	Vo (V)	3Io (A)	3Vo (V)
0	38,77	5773,50	116,32	17320,51
50	27,32	4067,45	81,95	12202,36
100	17,24	2566,83	51,72	7700,49
200	9,34	1390,62	28,02	4171,87
300	6,33	942,39	18,99	2827,18
400	4,77	710,95	14,32	2132,85
500	3,83	570,32	11,49	1710,96
600	3,20	475,98	9,59	1427,93
700	2,74	408,35	8,23	1225,04
800	2,40	357,51	7,20	1072,54
900	2,14	317,92	6,41	953,75
1000	1,92	286,21	5,77	858,63
1500	1,28	190,94	3,85	572,81
2000	0,96	143,24	2,89	429,71
2500	0,77	114,60	2,31	343,81
3000	0,64	95,51	1,92	286,52
4000	0,48	71,63	1,44	214,90
5000	0,38	57,31	1,15	171,93

ALIMENTADOR F 03

R falla (Ohm)	I_o (A)	V_o (V)	3I_o (A)	3V_o (V)
0	41,55	5773,50	124,64	17320,51
50	28,24	3923,70	84,71	11771,11
100	17,46	2426,66	52,39	7279,99
200	9,37	1302,70	28,12	3908,09
300	6,34	881,01	19,02	2643,04
400	4,78	664,15	14,34	1992,45
500	3,83	532,59	11,50	1597,77
600	3,20	444,40	9,59	1333,21
700	2,74	381,22	8,23	1143,65
800	2,40	333,74	7,20	1001,21
900	2,14	296,76	6,41	890,28
1000	1,92	267,15	5,77	801,45
1500	1,28	178,21	3,85	534,62
2000	0,96	133,68	2,89	401,05
2500	0,77	106,96	2,31	320,87
3000	0,64	89,13	1,92	267,40
4000	0,48	66,85	1,44	200,56
5000	0,38	53,48	1,15	160,45

ALIMENTADOR F 04

R falla (Ohm)	I _o (A)	V _o (V)	3I _o (A)	3V _o (V)
0	38,69	5773,50	116,08	17320,51
50	27,29	4071,67	81,87	12215,01
100	17,23	2571,07	51,69	7713,21
200	9,34	1393,32	28,01	4179,97
300	6,33	944,28	18,99	2832,85
400	4,77	712,39	14,32	2137,18
500	3,83	571,48	11,49	1714,45
600	3,20	476,95	9,59	1430,85
700	2,74	409,19	8,23	1227,56
800	2,40	358,25	7,20	1074,74
900	2,14	318,57	6,41	955,71
1000	1,92	286,80	5,77	860,39
1500	1,28	191,33	3,85	573,99
2000	0,96	143,53	2,89	430,59
2500	0,77	114,84	2,31	344,51
3000	0,64	95,70	1,92	287,11
4000	0,48	71,78	1,44	215,35
5000	0,38	57,43	1,15	172,28

ALIMENTADOR F 05

R falla (Ohm)	I _o (A)	V _o (V)	3I _o (A)	3V _o (V)
0	42,80	5773,50	128,39	17320,51
50	28,62	3860,73	85,86	11582,19
100	17,55	2367,82	52,66	7103,46
200	9,39	1266,48	28,16	3799,45
300	6,34	855,84	19,03	2567,52
400	4,78	644,99	14,34	1934,96
500	3,83	517,15	11,50	1551,46
600	3,20	431,49	9,60	1294,47
700	2,74	370,12	8,23	1110,37
800	2,40	324,01	7,21	972,04
900	2,14	288,11	6,41	864,32
1000	1,92	259,36	5,77	778,07
1500	1,28	173,00	3,85	519,01
2000	0,96	129,78	2,89	389,33
2500	0,77	103,83	2,31	311,49
3000	0,64	86,53	1,92	259,59
4000	0,48	64,90	1,44	194,70
5000	0,38	51,92	1,15	155,77

ALIMENTADOR F 06

R falla (Ohm)	I_o (A)	V_o (V)	3I_o (A)	3V_o (V)
0	42,85	5773,50	128,55	17320,51
50	28,63	3858,17	85,90	11574,52
100	17,56	2365,46	52,67	7096,39
200	9,39	1265,04	28,17	3795,12
300	6,34	854,84	19,03	2564,51
400	4,78	644,23	14,34	1932,68
500	3,83	516,54	11,50	1549,62
600	3,20	430,98	9,60	1292,93
700	2,74	369,68	8,23	1109,05
800	2,40	323,63	7,21	970,88
900	2,14	287,76	6,41	863,29
1000	1,92	259,05	5,77	777,14
1500	1,28	172,80	3,85	518,39
2000	0,96	129,62	2,89	388,87
2500	0,77	103,71	2,31	311,12
3000	0,64	86,43	1,92	259,28
4000	0,48	64,82	1,44	194,47
5000	0,38	51,86	1,15	155,58

ALIMENTADOR F 07

R falla (Ohm)	I_o (A)	V_o (V)	3I_o (A)	3V_o (V)
0	40,27	5773,50	120,82	17320,51
50	27,83	3988,94	83,48	11966,83
100	17,36	2489,23	52,09	7467,68
200	9,36	1341,65	28,08	4024,94
300	6,34	908,16	19,01	2724,47
400	4,78	684,83	14,33	2054,50
500	3,83	549,26	11,49	1647,78
600	3,20	458,35	9,59	1375,05
700	2,74	393,20	8,23	1179,60
800	2,40	344,24	7,20	1032,71
900	2,14	306,10	6,41	918,31
1000	1,92	275,57	5,77	826,70
1500	1,28	183,83	3,85	551,48
2000	0,96	137,90	2,89	413,70
2500	0,77	110,33	2,31	331,00
3000	0,64	91,95	1,92	275,85
4000	0,48	68,97	1,44	206,90
5000	0,38	55,17	1,15	165,52

ALIMENTADOR F 08

R falla (Ohm)	Io (A)	Vo (V)	3Io (A)	3Vo (V)
0	41,35	5773,50	124,05	17320,51
50	28,17	3933,74	84,52	11801,23
100	17,45	2436,18	52,34	7308,54
200	9,37	1308,59	28,12	3925,78
300	6,34	885,12	19,02	2655,35
400	4,78	667,28	14,34	2001,83
500	3,83	535,11	11,50	1605,33
600	3,20	446,51	9,59	1339,53
700	2,74	383,03	8,23	1149,08
800	2,40	335,32	7,20	1005,97
900	2,14	298,17	6,41	894,51
1000	1,92	268,42	5,77	805,26
1500	1,28	179,06	3,85	537,17
2000	0,96	134,32	2,89	402,96
2500	0,77	107,47	2,31	322,40
3000	0,64	89,56	1,92	268,68
4000	0,48	67,17	1,44	201,52
5000	0,38	53,74	1,15	161,22

ALIMENTADOR F 09

R falla (Ohm)	Io (A)	Vo (V)	3Io (A)	3Vo (V)
0	41,19	5773,50	123,58	17320,51
50	28,12	3941,69	84,37	11825,07
100	17,44	2443,74	52,31	7331,23
200	9,37	1313,28	28,11	3939,85
300	6,34	888,38	19,02	2665,15
400	4,78	669,77	14,34	2009,30
500	3,83	537,12	11,50	1611,35
600	3,20	448,19	9,59	1344,57
700	2,74	384,47	8,23	1153,41
800	2,40	336,59	7,20	1009,76
900	2,14	299,29	6,41	897,88
1000	1,92	269,43	5,77	808,30
1500	1,28	179,73	3,85	539,19
2000	0,96	134,83	2,89	404,48
2500	0,77	107,87	2,31	323,62
3000	0,64	89,90	1,92	269,70
4000	0,48	67,43	1,44	202,28
5000	0,38	53,94	1,15	161,83

ALIMENTADOR F 11

R falla (Ohm)	I _o (A)	V _o (V)	3I _o (A)	3V _o (V)
0	41,51	5773,50	124,52	17320,51
50	28,22	3925,81	84,67	11777,42
100	17,46	2428,65	52,38	7285,96
200	9,37	1303,93	28,12	3911,79
300	6,34	881,87	19,02	2645,62
400	4,78	664,81	14,34	1994,42
500	3,83	533,12	11,50	1599,35
600	3,20	444,85	9,59	1334,54
700	2,74	381,60	8,23	1144,79
800	2,40	334,07	7,20	1002,20
900	2,14	297,05	6,41	891,16
1000	1,92	267,42	5,77	802,25
1500	1,28	178,38	3,85	535,15
2000	0,96	133,82	2,89	401,45
2500	0,77	107,06	2,31	321,19
3000	0,64	89,22	1,92	267,67
4000	0,48	66,92	1,44	200,76
5000	0,38	53,54	1,15	160,61

ALIMENTADOR F 12

R falla (Ohm)	Io (A)	Vo (V)	3Io (A)	3Vo (V)
0	42,28	5773,50	126,85	17320,51
50	28,46	3886,55	85,39	11659,66
100	17,52	2391,77	52,55	7175,32
200	9,38	1281,18	28,15	3843,53
300	6,34	866,05	19,03	2598,14
400	4,78	652,76	14,34	1958,27
500	3,83	523,41	11,50	1570,23
600	3,20	436,72	9,59	1310,17
700	2,74	374,62	8,23	1123,86
800	2,40	327,95	7,21	983,86
900	2,14	291,61	6,41	874,84
1000	1,92	262,52	5,77	787,55
1500	1,28	175,11	3,85	525,33
2000	0,96	131,36	2,89	394,08
2500	0,77	105,10	2,31	315,29
3000	0,64	87,59	1,92	262,76
4000	0,48	65,69	1,44	197,08
5000	0,38	52,56	1,15	157,67

ALIMENTADOR F 14

R falla (Ohm)	I _o (A)	V _o (V)	3I _o (A)	3V _o (V)
0	36,50	5773,50	109,49	17320,51
50	26,48	4189,56	79,45	12568,68
100	17,02	2692,99	51,07	8078,98
200	9,30	1471,93	27,91	4415,80
300	6,32	999,50	18,95	2998,50
400	4,77	754,59	14,31	2263,77
500	3,83	605,54	11,48	1816,61
600	3,20	505,46	9,59	1516,39
700	2,74	433,70	8,22	1301,09
800	2,40	379,73	7,20	1139,20
900	2,13	337,70	6,40	1013,09
1000	1,92	304,02	5,77	912,07
1500	1,28	202,84	3,85	608,52
2000	0,96	152,17	2,89	456,51
2500	0,77	121,75	2,31	365,25
3000	0,64	101,47	1,92	304,40
4000	0,48	76,11	1,44	228,32
5000	0,38	60,89	1,15	182,66

ALIMENTADOR F 16

R falla (Ohm)	Io (A)	Vo (V)	3Io (A)	3Vo (V)
0	42,52	5773,50	127,55	17320,51
50	28,53	3874,79	85,60	11624,38
100	17,53	2380,83	52,60	7142,50
200	9,39	1274,46	28,16	3823,38
300	6,34	861,38	19,03	2584,14
400	4,78	649,20	14,34	1947,61
500	3,83	520,55	11,50	1561,64
600	3,20	434,33	9,60	1302,99
700	2,74	372,56	8,23	1117,69
800	2,40	326,15	7,21	978,45
900	2,14	290,01	6,41	870,03
1000	1,92	261,07	5,77	783,21
1500	1,28	174,15	3,85	522,44
2000	0,96	130,64	2,89	391,91
2500	0,77	104,52	2,31	313,55
3000	0,64	87,10	1,92	261,31
4000	0,48	65,33	1,44	195,99
5000	0,38	52,27	1,15	156,80

ALIMENTADOR F 17

R falla (Ohm)	I _o (A)	V _o (V)	3I _o (A)	3V _o (V)
0	40,16	5773,50	120,48	17320,51
50	27,79	3994,85	83,37	11984,56
100	17,36	2494,98	52,07	7484,94
200	9,36	1345,25	28,07	4035,75
300	6,33	910,67	19,00	2732,02
400	4,78	686,75	14,33	2060,26
500	3,83	550,81	11,49	1652,42
600	3,20	459,64	9,59	1378,93
700	2,74	394,31	8,23	1182,94
800	2,40	345,21	7,20	1035,64
900	2,14	306,97	6,41	920,91
1000	1,92	276,35	5,77	829,04
1500	1,28	184,35	3,85	553,05
2000	0,96	138,29	2,89	414,88
2500	0,77	110,65	2,31	331,94
3000	0,64	92,21	1,92	276,63
4000	0,48	69,16	1,44	207,48
5000	0,38	55,33	1,15	165,99

ALIMENTADOR F 18

R falla (Ohm)	I _o (A)	V _o (V)	3I _o (A)	3V _o (V)
0	39,05	5773,50	117,14	17320,51
50	27,41	4053,08	82,23	12159,24
100	17,26	2552,43	51,79	7657,28
200	9,34	1381,47	28,03	4144,42
300	6,33	935,99	18,99	2807,97
400	4,78	706,06	14,33	2118,19
500	3,83	566,38	11,49	1699,13
600	3,20	472,68	9,59	1418,03
700	2,74	405,51	8,23	1216,54
800	2,40	355,03	7,20	1065,08
900	2,14	315,71	6,41	947,12
1000	1,92	284,22	5,77	852,65
1500	1,28	189,61	3,85	568,82
2000	0,96	142,24	2,89	426,71
2500	0,77	113,80	2,31	341,41
3000	0,64	94,84	1,92	284,52
4000	0,48	71,13	1,44	213,40
5000	0,38	56,91	1,15	170,73

ALIMENTADOR F 19

R falla (Ohm)	I _o (A)	V _o (V)	3I _o (A)	3V _o (V)
0	40,58	5773,50	121,75	17320,51
50	27,93	3973,05	83,78	11919,15
100	17,39	2473,83	52,17	7421,49
200	9,36	1332,02	28,09	3996,05
300	6,34	901,44	19,01	2704,32
400	4,78	679,71	14,33	2039,14
500	3,83	545,13	11,50	1635,40
600	3,20	454,90	9,59	1364,69
700	2,74	390,23	8,23	1170,70
800	2,40	341,64	7,20	1024,91
900	2,14	303,79	6,41	911,37
1000	1,92	273,48	5,77	820,45
1500	1,28	182,44	3,85	547,31
2000	0,96	136,86	2,89	410,57
2500	0,77	109,50	2,31	328,49
3000	0,64	91,25	1,92	273,76
4000	0,48	68,44	1,44	205,33
5000	0,38	54,76	1,15	164,27

ALIMENTADOR F 21

R falla (Ohm)	Io (A)	Vo (V)	3Io (A)	3Vo (V)
0	42,22	5773,50	126,66	17320,51
50	28,44	3889,71	85,33	11669,12
100	17,51	2394,71	52,53	7184,14
200	9,38	1282,99	28,15	3848,96
300	6,34	867,30	19,03	2601,91
400	4,78	653,71	14,34	1961,14
500	3,83	524,18	11,50	1572,54
600	3,20	437,37	9,59	1312,11
700	2,74	375,17	8,23	1125,52
800	2,40	328,44	7,21	985,32
900	2,14	292,05	6,41	876,14
1000	1,92	262,90	5,77	788,71
1500	1,28	175,37	3,85	526,11
2000	0,96	131,55	2,89	394,66
2500	0,77	105,25	2,31	315,76
3000	0,64	87,72	1,92	263,15
4000	0,48	65,79	1,44	197,37
5000	0,38	52,63	1,15	157,90

DIAGRAMA UNIFILAR EDELNOR

